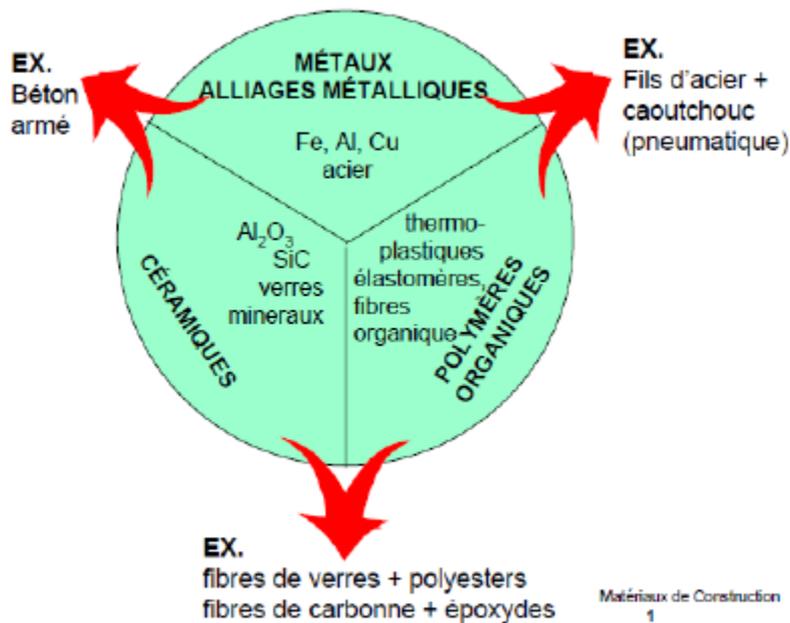


Chapitre 1: Généralités

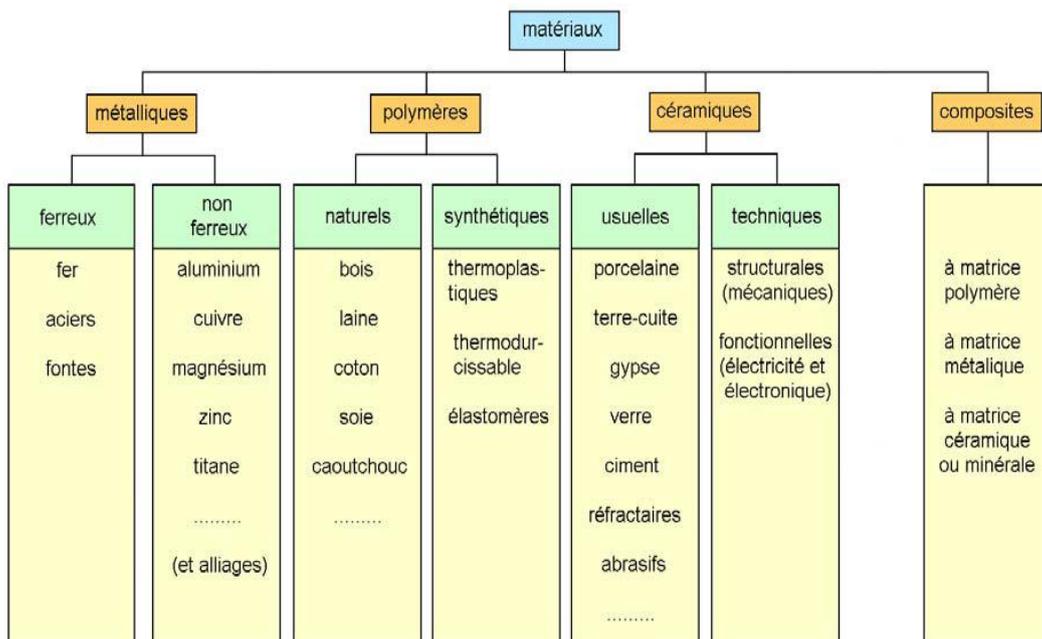
1.1 Classification des matériaux :

Les matériaux peuvent être classés selon leurs compositions chimique et structures atomique. On peut distinguer :

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



Classification des matériaux



Principales familles de matériaux

1.1.1 Les métaux et alliages

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



1.1.2 Les céramiques et les verres

Les matériaux minéraux ou céramiques – liaison ionique et liaison covalente : matériaux inorganiques caractérisés par leur résistance mécanique et thermique (réfractaires). Ce sont des roches, des céramiques ou des verres : porcelaine, pierre naturelle, plâtre, etc.



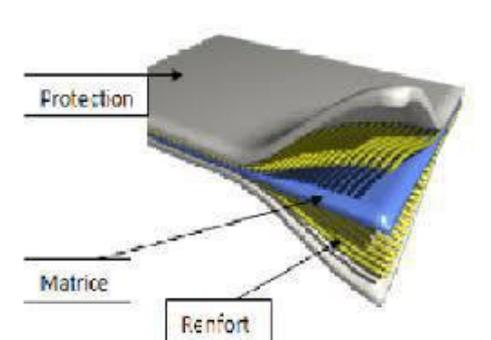
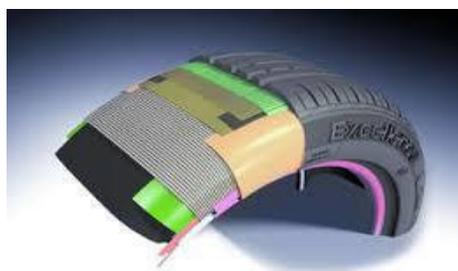
1.1.3 Les polymères

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



1.1.4 Les matériaux composites

Les matériaux composites sont des assemblages d'au moins deux des trois types de matériaux déjà cités, non miscibles : plastiques renforcés de fibre de verre, fibre de carbone ou de Kevlar, contreplaqué, béton, béton armé.



1.2 Domaines d'utilisations

Voici quelques applications des grandes classes de matériaux :

Les métaux et alliages : mobilier urbain en acier galvanisé, tôles en acier, filtres, électrodes de batterie, coupe-flammes en mousse métallique, etc.

les céramiques et les verres : vitres, disques de frein en carbone-céramique, outils de machine-outil en carbure de tungstène, pot catalytique en zircon, etc. ;

les polymères : bouteilles d'eau en polytéréphtalate d'éthylène (PET), CD en polycarbonate (PC), vêtements en polyéthylène (PE), Rilsan, Gore-tex, bouteilles de lait, canalisations en polyéthylène haute densité (PEHD), pièces mécaniques en polyamide, mousses d'isolation en polyuréthane (PUR), sacs biodégradables en acide

polylactique (PLA), etc. ;

Les composites : coques de bateaux, pales d'hélicoptères, aubes de turbine, casques de moto, skis, surfs, planches à voile, arbres de transmission, etc. ;

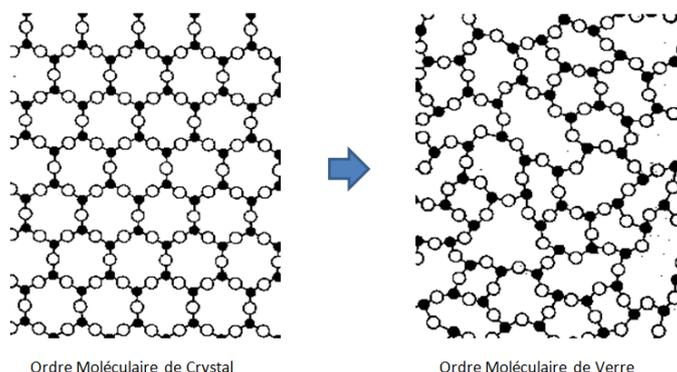
Remarque: Le développement de la protection de l'environnement et du recyclage encourage les entreprises à rechercher de nouveaux matériaux, comme les matériaux biodégradables. L'acide polylactique, extrait de végétaux comme la betterave ou le maïs, en est un bon exemple. Il est actuellement utilisé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

1.3 Structure des matériaux : matériaux amorphes et matériaux cristallins

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

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

- L'absence d'une température de fusion nettement déterminée.
- L'isotropie (mêmes propriétés dans les différentes directions) surtout les propriétés physiques.



On trouve ainsi une différence caractéristique dans les courbes de refroidissement des corps amorphes et cristallins, le refroidissement des corps amorphes se traduit par une courbe décroissante et continue.

Remarque

Aujourd'hui les solides amorphes représentent un grand intérêt dans le domaine de la technologie. Les semi-conducteurs amorphes peuvent remplacer des composants

électroniques. Des mémoires d'ordinateurs ont été élaborées à partir de matériaux amorphes.

1.4 Notions de cristallographie

La cristallographie est une science qui étudie les cristaux c'est à dire la formation, la croissance, la forme extérieure, la structure interne et les propriétés physiques de la matière cristallisée. la cristallographie se dégagea progressivement de la minéralogie et se rapprocha de la physique et de la chimie en devenant une science indépendante.

Les corps cristallins sont caractérisés par les propriétés suivantes :

a. Ils sont caractérisés par une certaine anisotropie (les propriétés physiques ne sont pas les mêmes dans les différentes directions), l'anisotropie peut être constatée à l'échelle macro et microscopique.

b. Un matériau cristallin peut présenter soit :

- Un monocristal (cristal unique) par exemple le cristal de quartz, de calat, de diamant etc.

- Un polycristal ou une agglomération de petits cristaux (échantillon d'acier).

c. Les cristaux sont caractérisés par des faces planes, des arêtes rectilignes et des sommets tels :

$$F + S = A + 2$$

F : faces, S : sommets, A : arêtes.

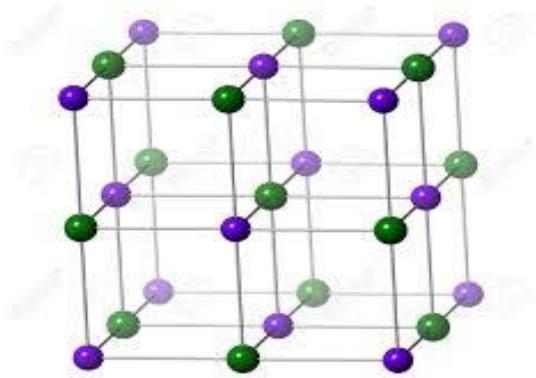
Les faces sont caractérisées par deux lois : Si l'on rapporte les différentes faces d'un cristal à un système de coordonnées à 3 dimensions, la position d'une face quelconque peut toujours être exprimée par trois nombres entiers simples. Si on fait intervenir la notion de réseau tridimensionnel, la position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

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

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

Structure réticulaire

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

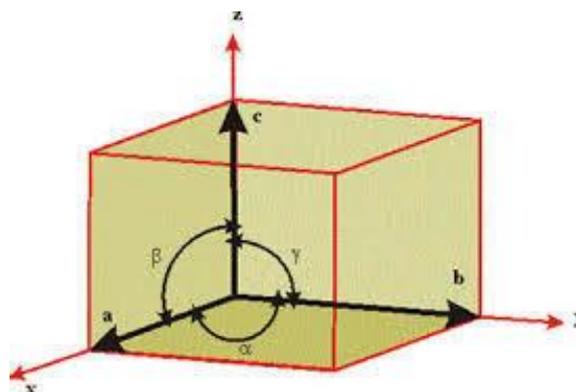


Un réseau cristallin est constitué par un assemblage d'atomes (ions) arrangés suivant un motif qui se reproduit périodiquement dans les trois dimensions. Donc un réseau cristallin est un réseau spatial imaginaire ayant pour noeuds les atomes (sommets des parallélépipèdes). Les droites passant par ces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

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

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

- **Maille élémentaire** : c'est aussi le plus petit parallélépipède qui permet de reproduire tous les réseaux tridimensionnels par translation continue de ces éléments suivant les trois directions. Un réseau cristallin d'un solide est composé d'un nombre infini de mailles élémentaires à l'intérieur desquelles les atomes sont disposés dans un ordre bien défini.



- **Motif** : c'est la reproduction indéfiniment et régulièrement des atomes ou ions dans le cristal, l'ensemble régulier de motifs est appelé réseau :
- Contrairement au motif le noeud n'a pas de réalité physique.
- La rangée du réseau est un ensemble de noeuds alignés, c'est une droite passant par des noeuds du réseau. La distance qui sépare deux noeuds consécutifs d'une rangée est appelée période ou paramètre de rangée.

Parmi les systèmes cristallins, on trouve le :

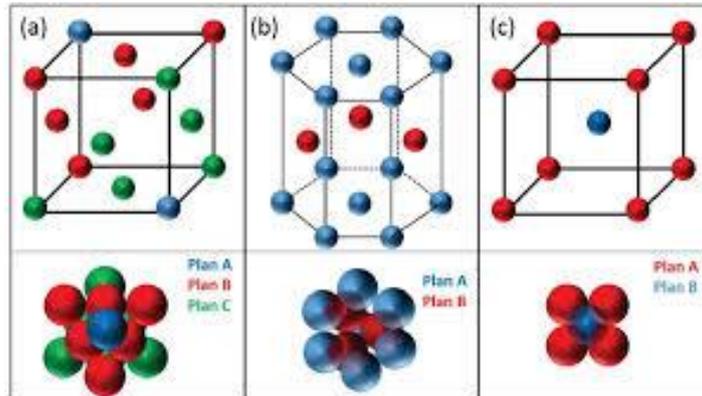
- **Maille cubique :**

- **Maille cubique simple :** atomes présents uniquement aux points du réseau.

- **Système cubique centré (système CC) :** il y a un atome supplémentaire au centre du cube.

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

- Maille hexagonal : le système hexagonal peut se décomposer en prismes à base losangique.

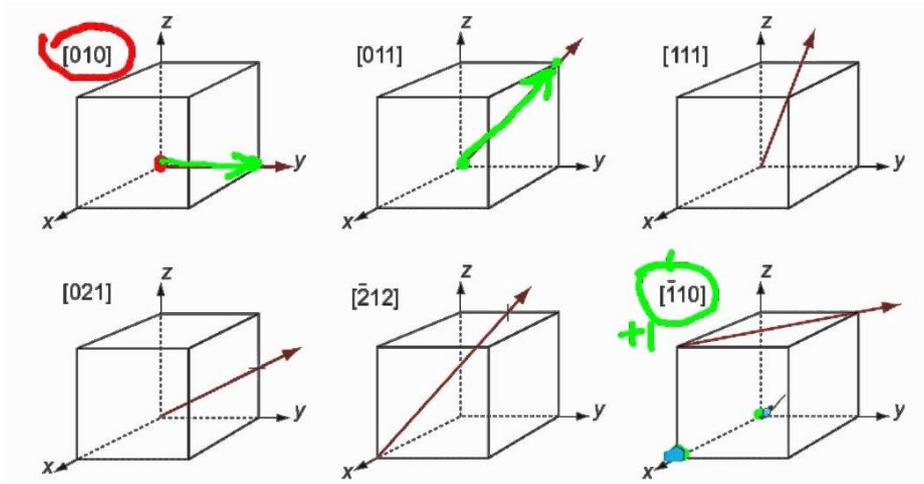


Plans et directions cristallographiques

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

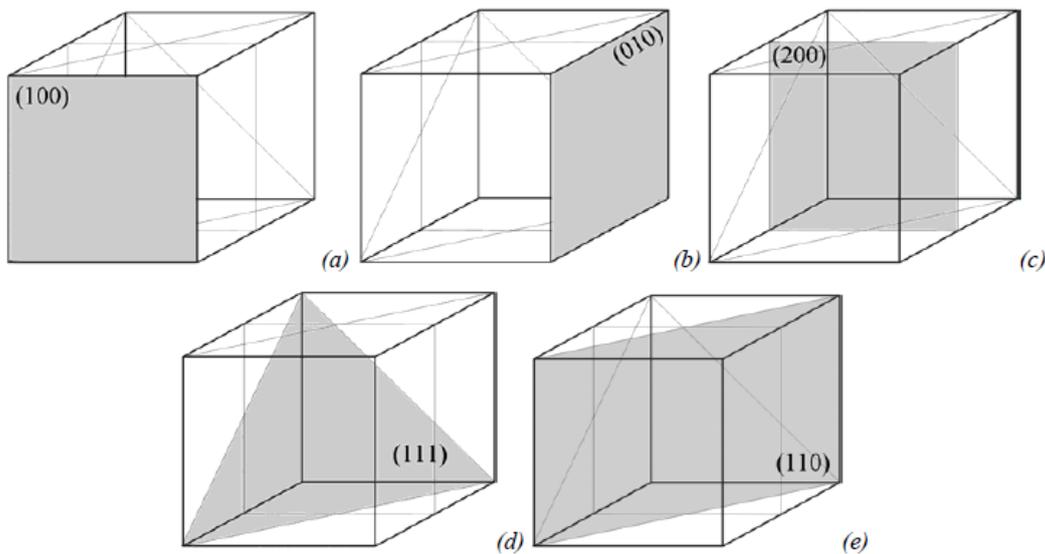
Méthode pour désigner une direction :

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



Méthode pour désigner un plan :

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



Exercice

déterminez le nombre d'atome dans les systèmes cubique simple, cubique centré, cubique à face centrées et hexagonal compacte ?

Réponse :

- ✓ Cubique simple

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

- ✓ Cubique à faces centrées

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

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

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

- ✓ Cubique centré

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

$$1 \text{ atome au centre du cube : } (1 \times \frac{1}{1})$$

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

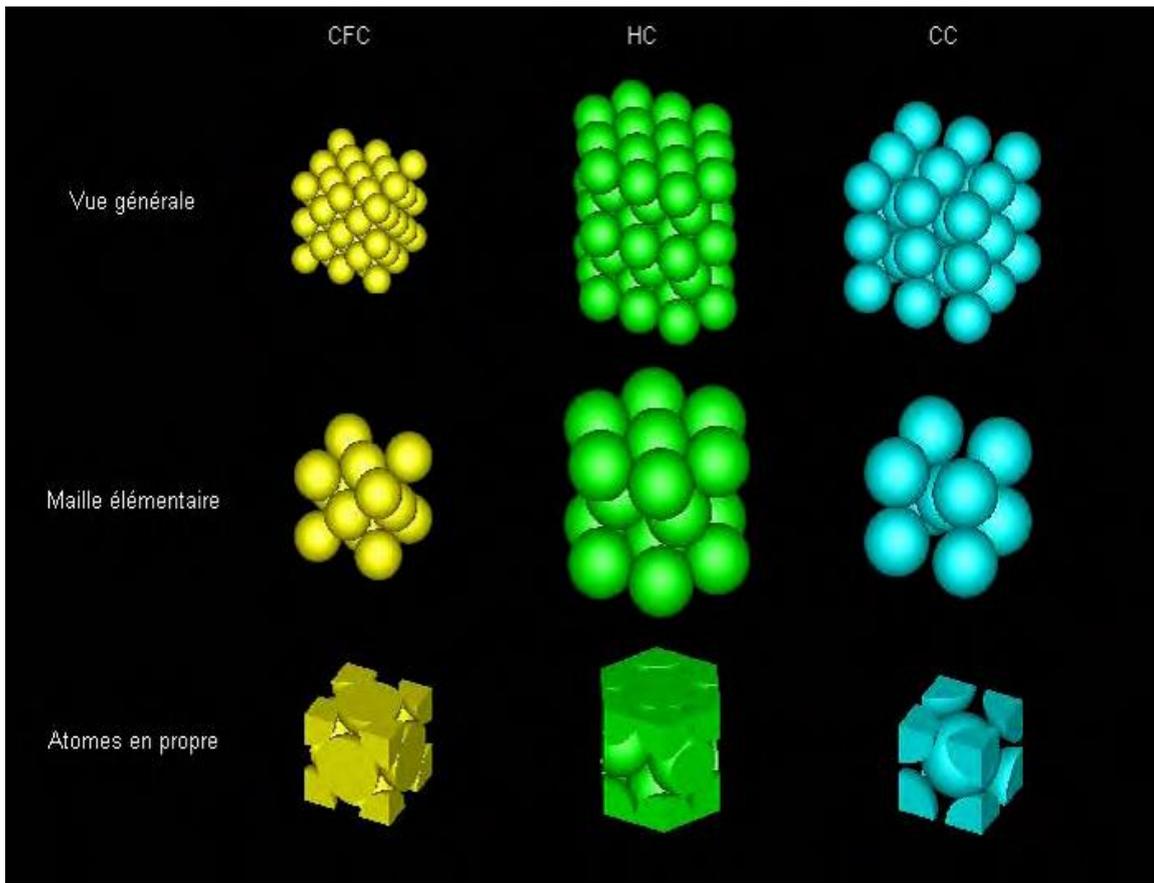
- ✓ hexagonal compacte

$$1 \text{ atome à chaque sommet : } (12 \times \frac{1}{6})$$

$$\text{atome au centre des 2 bases : } (2 \times \frac{1}{2})$$

$$3 \text{ atomes au centre : } 3 \times \frac{1}{1}$$

$$\text{Donc: } (12 \times \frac{1}{6}) + (2 \times \frac{1}{2}) + (3 \times \frac{1}{1}) = 6 \text{ atomes par maille}$$



Chapitre 2 : Diagrammes d'équilibre

1 Cristallisation de matériaux

1.1 Principe de la cristallisation et courbes de refroidissement

Un diagramme de phases (ou diagramme d'équilibre) permet de résumer les constitutions d'équilibre d'un système d'alliage. Un diagramme de phases permet de trouver, pour un mélange donné, la constitution des phases en présence, en équilibre les unes avec les autres.

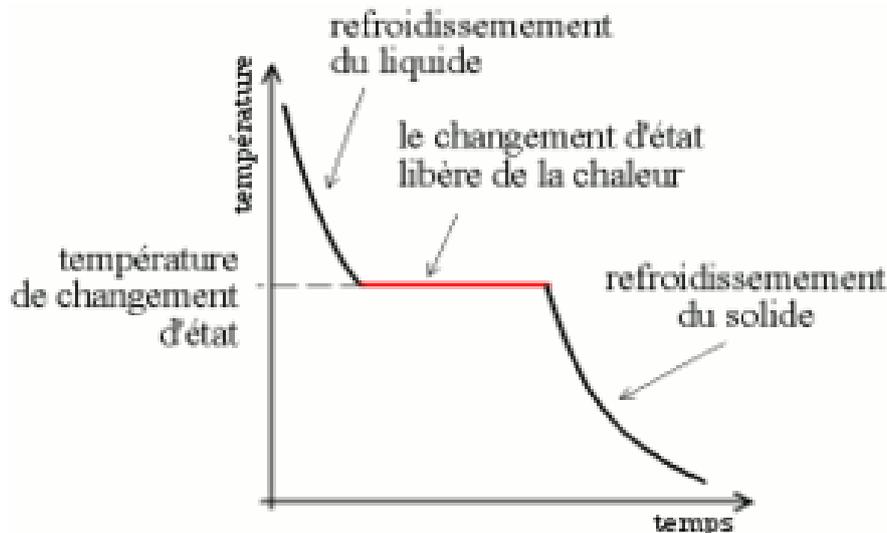
Deux facteurs physiques ont une influence sur la nature et la composition des phases présentes :

- (1) la température qui joue un rôle particulièrement important lors de la coulée et dans les modifications des propriétés mécaniques des alliages dentaires ;
- (2) la pression qui est habituellement négligée car elle n'a d'influence qu'à des niveaux extrêmement élevés.

Deux types de transformations peuvent être retrouvées dans les diagrammes de phases. L'étude des transformations liquide-solide donne les diagrammes de solidification. L'étude des transformations solide-solide permet de prédire les propriétés d'un alliage après traitement thermique.

Définitions :

- **Une phase** est un domaine du matériau dont les propriétés physiques et chimiques sont uniformes. Cette région ou cet ensemble de régions sont caractérisés par une structure et par un arrangement atomique identiques.
- **Un composant** est un corps pur. Il peut être simple (exemples : Ti, Ag, Cu...) ou être un composé chimique (H_2O , Al_2O_3 , SiO_2 ...).
- **Solidification** lorsqu'on refroidit un métal ou un alliage en fusion à température ambiante entraîne une solidification. Le passage de la phase liquide à la phase solide s'appelle un changement de phase.
- **courbe de refroidissement** est le programme précis, dans une fourchette de temps, d'une variation de [température](#) pour atteindre la température ambiante.



Remarque :

- Un composant peut être présent dans différentes phases, par exemple un glaçon dans de l'eau liquide. Deux composants mélangés peuvent ne former qu'une seule phase, comme l'eau et l'alcool. S'ils peuvent se mélanger quel que soit le dosage, on dit qu'ils sont totalement miscibles. S'ils ne peuvent se mélanger, comme l'eau et l'huile, ils forment alors deux phases, distinctes et sont dits non miscibles. Certains métaux ne sont pas miscibles, comme le germanium et l'aluminium, pour lesquels, dès le stade de la fusion, les deux phases se retrouvent totalement séparées.
- Les diagrammes de phases binaires sont les diagrammes les plus simples à établir. Les courbes du diagramme de phases déterminent :
 - (1) les limites de domaines dans lesquels peuvent exister des phases ;
 - (2) la composition chimique;
 - (3) les proportions de ces différentes phases.

Notion de variance :

Variance d'un système.

$$v = c + 2 - \varphi$$

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

C: Le nombre de constituant indépendant

2: Le nombre de variables intensives T et P

φ : Le nombre de phase

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

$$v = c + 1 - \varphi$$

1: variable intensive T

1.2 Cristallisation d'un métal pur

Lorsqu'un métal pur en fusion est refroidi, sous pression constante (pression atmosphérique par exemple), le changement de phase s'effectue toujours à une température fixe : le point de fusion. Au point de fusion, les deux phases liquide et solide co-existent.

La détermination de ce point s'effectue en enregistrant la courbe de refroidissement (température en fonction du temps). La cristallisation étant un phénomène exothermique, au passage par le point de fusion, la chaleur perdue par le refroidissement de l'alliage est temporairement compensée, ce que montre la **figure 1**. Ce palier isotherme est d'autant plus marqué que le refroidissement est lent et que la masse d'alliage est plus grande.

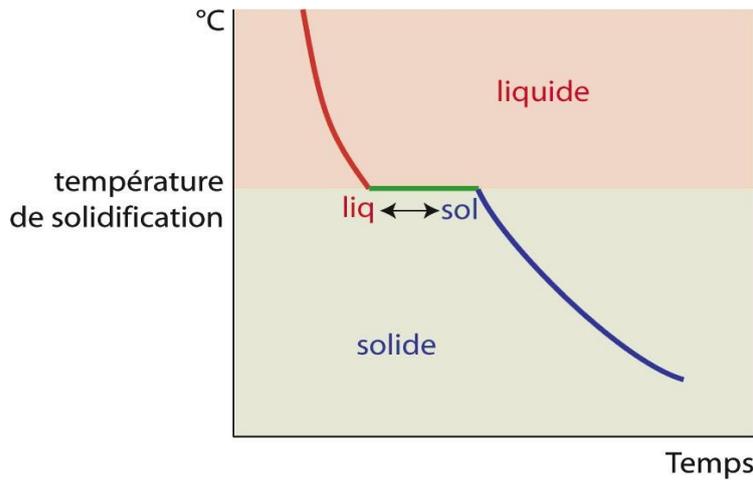


figure 1: courbe de refroidissement d'un métal pur

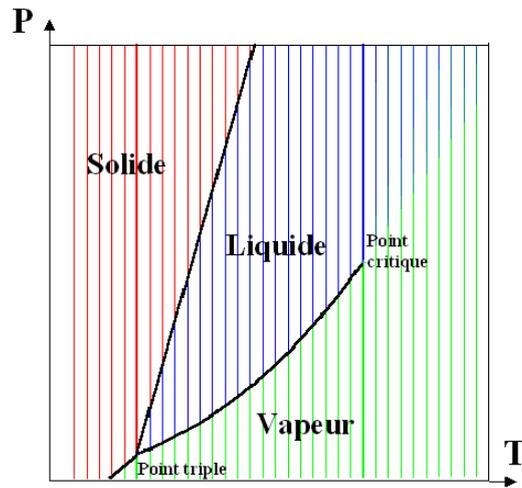


Diagramme d'équilibre d'un corps pur

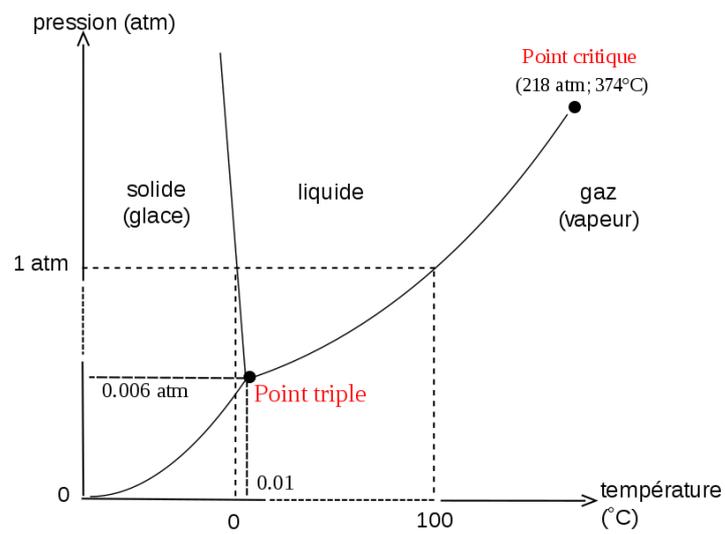


Diagramme d'équilibre de l'eau

1.3 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 2**). 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.

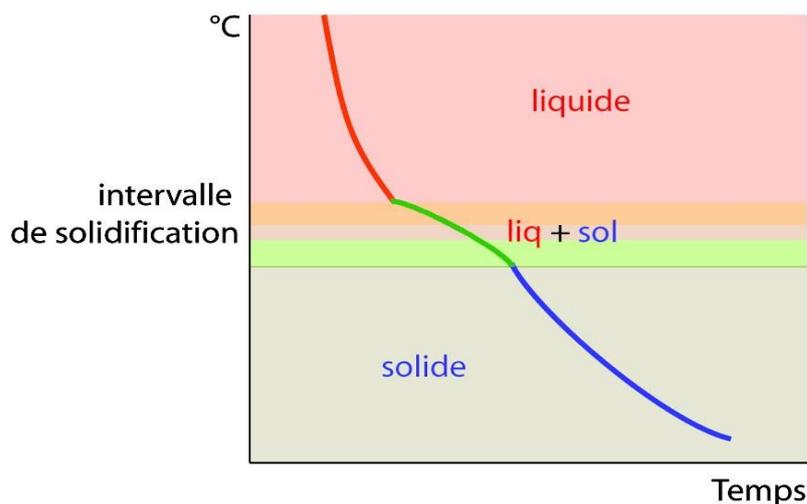


Figure 2 : Exemple de courbe de refroidissement d'un alliage de composition AB

Pour construire le diagramme de phase d'un alliage binaire A-B, il suffit d'enregistrer les courbes de refroidissement pour chaque concentration de B dans A en partant de A, métal pur jusqu'à B, métal pur (exemple **figure 3**).

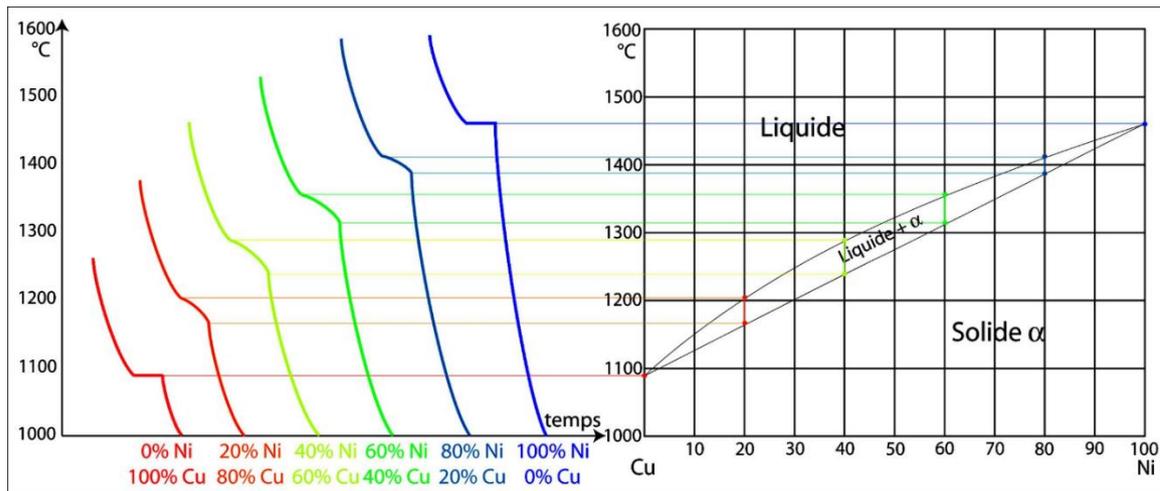


Figure 3 : Exemple de construction du diagramme de phase de l'alliage CuNi

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

2 Diagramme d'équilibre de deux métaux complètement miscibles

C'est par exemple le cas du laiton, un alliage de cuivre (température de fusion = 1084°C) et de zinc (température de fusion = 420°C) ou le cas d'un alliage cuivre (température de fusion = 1084°C) et du nickel (température de fusion = 1453°C). Ils sont alors dits totalement miscibles.

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

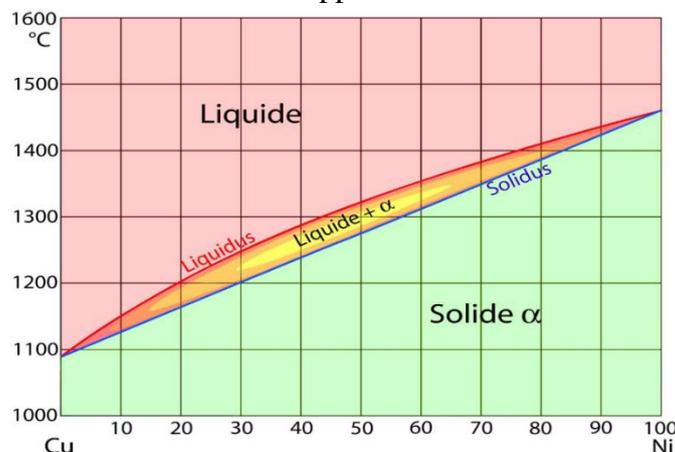


Figure 4 : Diagramme de phase cuivre-nickel avec pourcentage massique du nickel dans le cuivre

Ce type de diagramme est appelé diagramme à un fuseau. On obtient un diagramme à un fuseau avec d'autres alliages binaires à miscibilité totale à l'état solide : Cu-Pd, Ag-Au, Ir-Pt, Ag-Pd...

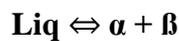
3 Diagramme d'équilibre de deux métaux partiellement miscibles

C'est évidemment le cas le plus fréquent dans les alliages binaires. Deux types de transformations peuvent se rencontrer : les diagrammes avec point eutectique et les diagrammes avec point péritectique.

3. 1. diagrammes avec point eutectique

Dans ce type de diagramme existe un point invariant dont la température est inférieure à la température de fusion des deux constituants. Un des intérêts de ces alliages eutectiques est de pouvoir être utilisé en brasure. L'exemple présenté ici est l'alliage binaire argent-cuivre. Les températures de fusion de l'argent et du cuivre purs sont respectivement de 962°C et de 1083°C. À 779°C, la solubilité du cuivre dans l'argent est de 8,8% massique et la solubilité de l'argent dans le cuivre est de 8% massique. Pour les alliages compris entre ces deux intervalles, l'ensemble des courbes de refroidissement présente un palier isotherme dont la longueur maximale se situe au point eutectique (**figure 7** : point E situé à 779°C avec 60,1% d'argent et 39,9% de cuivre).

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



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

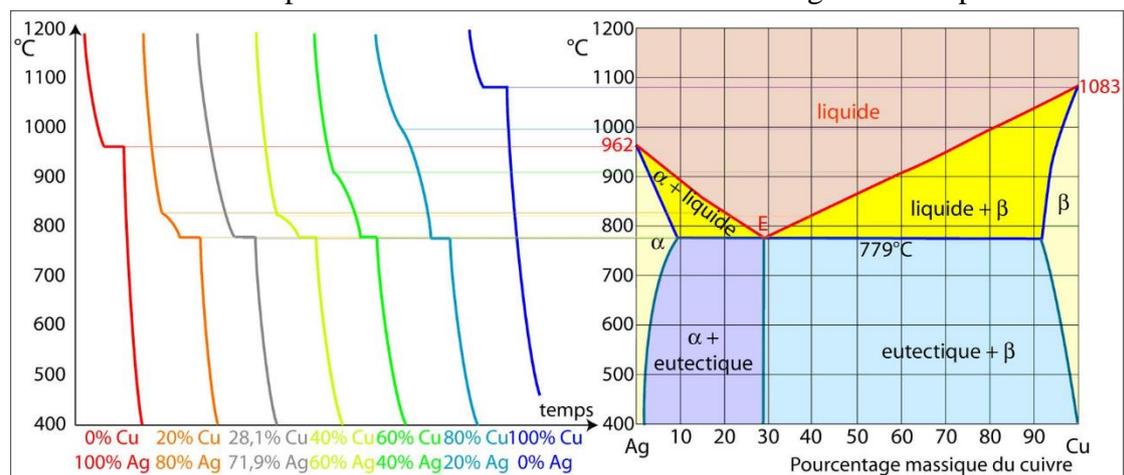


Figure 7 : construction d'un diagramme de phases avec point eutectique

3.2. diagrammes avec point péritectique

Dans une transformation péritectique, une phase liquide et une phase solide se transforment en une seule phase solide de composition définie. Le point péritectique (point P, **figure 8**) est invariant, à température fixe avec un équilibre entre les trois phases.



La partie supérieure du diagramme de phases de l'alliage argent platine (**figure 9**) illustre l'aspect typique d'une transformation du type péritectique. Le point péritectique se situe à 1185°C pour une composition de 55% m de platine et 45% m d'argent.

À cette composition, juste au-dessus de 1185°C coexistent deux phases, une phase β solide de composition $C_{\beta} = 86\%$ Pt et une phase liquide de composition $C_l = 32\%$ Pt. À 1185°C, ces deux phases se transforment brutalement en une seule phase solide α de composition $C_{\alpha} = 55\%$ Pt

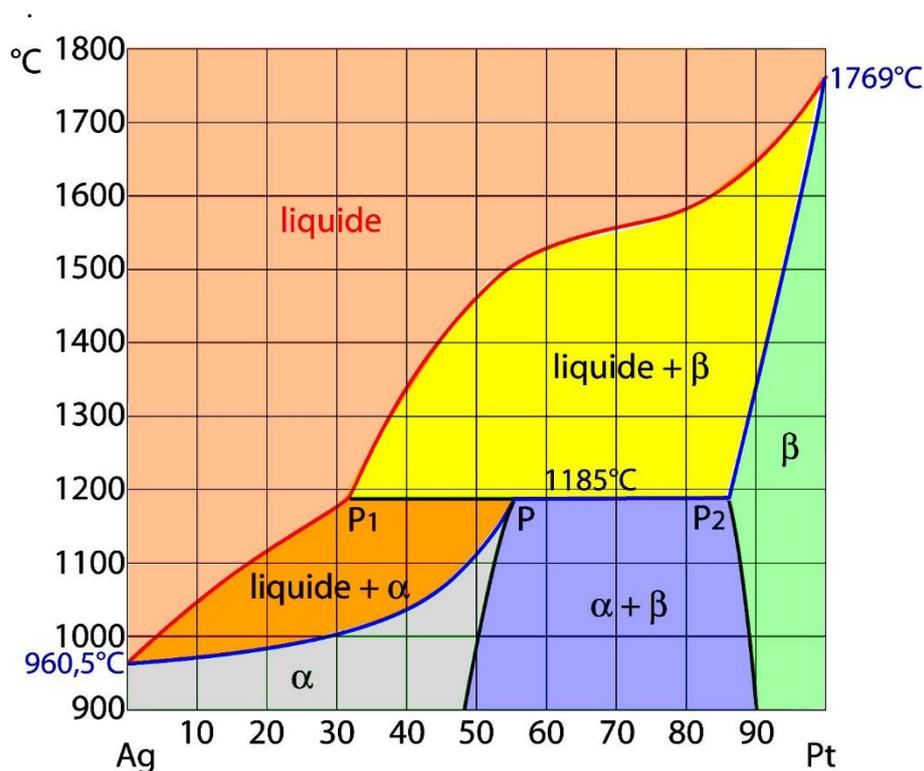


Figure 8 : diagramme de phase de l'alliage Ag-Pt

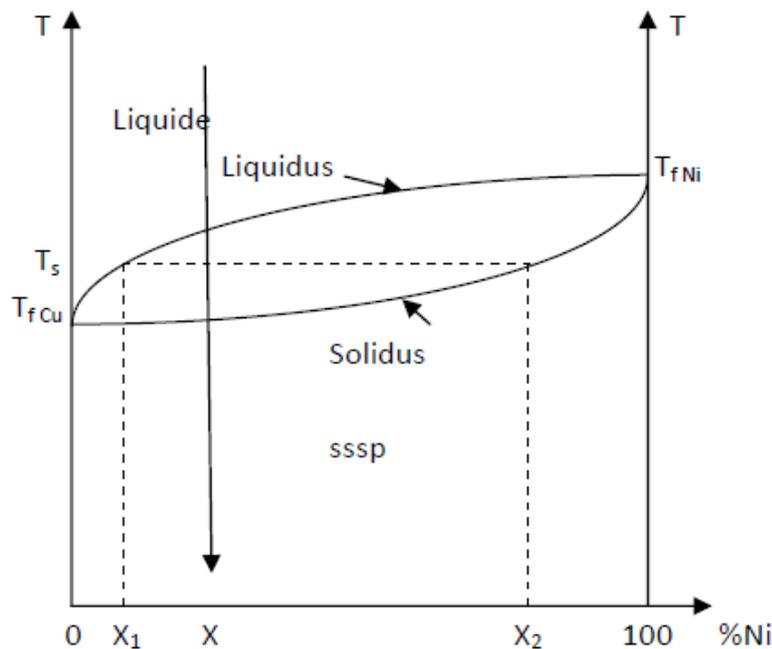
Les alliages dont la composition est inférieure à celle de P1 (32% Pt) et ceux dont la composition est supérieure à P2 (86% Pt) se comportent comme des solutions solides à un seul fuseau.

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

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

Regles de phases:

La **règle de l'horizontale** indique que l'on a, à une certaine température T_s , du liquide à la concentration X_1 en Ni et du solide à la concentration X_2 en Ni.



La **règle des segments inverses** donne les proportions respectives **avec les pourcentages massiques** impérativement :

$$\% \text{ liquide à } X_1\% \text{ en Ni} = \frac{x_2 - x}{x_2 - x_1} \times 100$$

$$\% \text{ solide à } X_2\% \text{ en Ni} = \frac{x - x_1}{x_2 - x_1} \times 100$$

Chapitre 3 : diagrammes fer-carbone

3.1 Caractéristiques du fer et du carbone

Le fer est le métal de base le plus important pour les alliages techniques. Le fer pur n'est pas employé dans l'industrie, les plus employés sont les alliages de fer avec le carbone qui sont la fonte et l'acier.

✓ **Caractéristiques du fer:**

Le fer est de couleur blanche possédant les caractéristiques suivantes :

- Masse atomique : 55,85.
- Nombre atomique : 26.
- Rayon atomique 1,27 Å (CFC).
- Masse volumique 7,8 g/cm³.
- Température de fusion 1539°C

Il possède une dureté HB de 60 kp/mm², une contrainte limite de traction d'environ 20 kp/mm² et une faible limite d'élasticité.

C'est un bon conducteur de chaleur et d'électricité (une résistivité électrique à 20°C de $9,76 \cdot 10^{-8} \Omega m$).

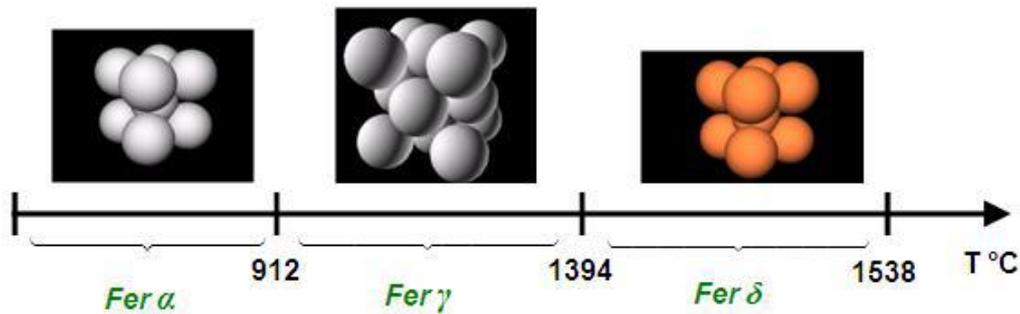
Grâce à sa grande perméabilité magnétique, il est très utilisé dans l'électrotechnique. Les propriétés magnétiques du fer dépendent dans une grande mesure de sa pureté et des régimes de traitement thermiques.

On connaît deux formes (variétés) allotropiques du fer (deux réseaux cristallins différents). Le fer α dont le réseau est cubique centré (CC) et le fer γ dont le réseau est cubique à faces centrées (C.F.C).

Le 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.

Rq: Le phénomène de la modification du réseau cristallin sous l'effet de la température porte le nom de transformation allotropique.



Transformation allotropique du Fer

✓ **Caractéristiques du carbone :**

C'est un élément non métallique très abondant, (0,1% en masse dans l'écorce terrestre). Il est rare à l'état libre, on le rencontre à l'état combiné dans toutes les substances végétales et animales comme dans le pétrole, le charbon, le bois, la houille, etc. Ses caractéristiques sont les suivantes :

- Numéro atomique : 6.
- Masse atomique : 12.
- Rayon atomique : 0,77 Å.
- Masse volumique : 2,5 g/cm³.
- Température de fusion : 3500°C.

C'est un élément polymorphe et il existe deux variétés cristallines dans les conditions ordinaires, le diamant et le graphite. La variété du diamant est métastable à réseau cristallin C.F.C et il est classé comme le plus dur des corps solides, c'est aussi un isolant électrique.

Le graphite possède un réseau hexagonal simple, c'est un matériau réfractaire, relativement bon conducteur d'électricité.

Le carbone dont le point de fusion est supérieur à 3500°C est soluble dans le fer et peut se cristalliser à l'état pur en formant le graphite ou se combiner avec le fer en formant une phase intermétallique Fe₃C appelée cémentite ou carbone de fer (HB = 800kp/mm²).

La présence aussi du silicium peut favoriser la décomposition de la cémentite (formation du graphite). Donc on a l'existence de deux diagrammes d'équilibres :

- Le diagramme d'équilibre métastable Fe-Fe₃C (cémentite).
- Le diagramme d'équilibre stable fer-graphite.

3.2 Diagramme d'équilibre fer-carbone

La phase riche en carbone qui reste à l'état de graphite pur qui a une miscibilité nulle avec le fer. Le diagramme correspondant est dit stable ou à graphite. Son obtention exige la décomposition du carbure Fe_3C en refroidissant avec une vitesse très lente et en ajoutant un catalyseur à grande pouvoir de graphitisation tel que le silicium

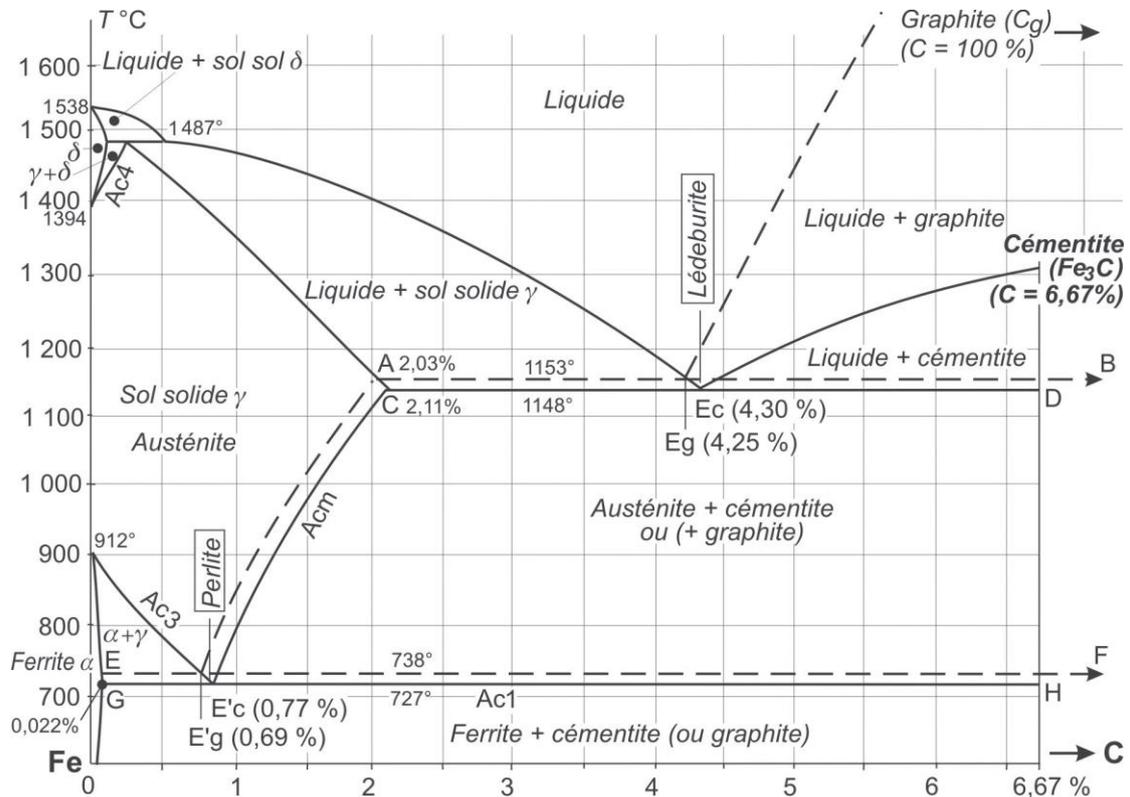


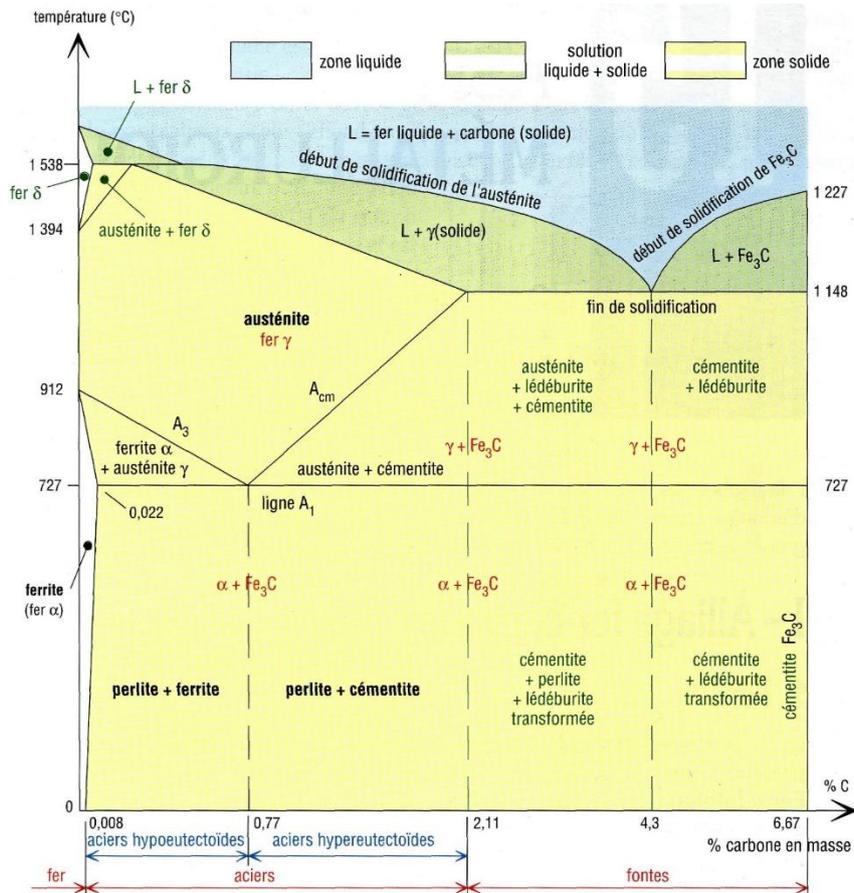
Diagramme fer-cémentite (en traits pleins) et diagramme fer-graphite (en traits interrompus). Les constituants de structure sont encadrés pour les distinguer des phases.

3.3 Diagramme d'équilibre fer-cémentite

C'est le diagramme d'équilibre Fer-carbone métastable. Il représente la composition des phases et la structure des alliages dont la concentration varie du fer pur à la cémentite. La cémentite correspond à 6,67 % de carbone.

Les alliages à teneur en carbone inférieure ou égale à 2,06 % C s'appellent aciers et dont la teneur en carbone est supérieure à 2,06 % C s'appellent fontes.

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



A partir du diagramme fer-cémentite, on peut définir les aciers et fontes suivant la teneur en carbone.

% de carbone	Désignation
0,02 à 0,8	Aciers hypo-eutectoides
0,8	Aciers eutectoides
0,8 à 2,06	Aciers hyper-eutectoides
2,06 à 4,3	fontes hypo-eutectiques
4,3	Fontes eutectiques
4,3 à 6,67	Fontes hyper-eutectiques

Les différentes phases du système Fer-Carbone

- **La ferrite α**

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

- **La ferrite δ**

Solution d'insertion de quelques atomes de carbone dans le fer δ. Sa structure est cubique centrée 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 $1145^\circ C$. Il est stable qu'à haute température. L'austénite est très ductile.

- **La cémentite (Carbone de fer Fe_3C)**

La cémentite est un composé chimiquement défini. Sa décomposition égale à $6,67\%$ en masse de carbone, en état métastable. La cémentite se présente sous forme de lamelles ou de globules dans la perlite ou d'aiguilles dans les fontes blanche. Elle est très dure et très fragile.

- **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 ($A\% \approx 10$).

- **La lédéburite**

C'est un mélange eutectique entre l'austénite et la cémentite et provenant lors du refroidissement du métal liquide avec $4,3\%$ de carbone à la température eutectique.

3.4 Désignation normalisée des aciers et des fontes

- **Désignation des aciers**

-Aciers non alliés

Désignation selon la composition chimique
aciers non alliés sont désignés par la lettre C suivi d'un chiffre représentant le la teneur en carbone x 100

Exemple : C 45

Cet acier non allié (C) possède une teneur en carbone de $0,45\%$

Désignation selon l'emploi

Aciers non-alliés d'usage général-

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

Exemple: S 235

Aciers non-alliés pour la construction mécanique

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

Exemple: E295

- **Désignation des Fontes**

Les fontes a graphite lamellaire

la désignation de fontes a graphite lamellaire est composée de :

- Le préfixe EN suivi d'un tiret

- Les lettres GJL qui représente la fonte a graphite lamellaire

- Un tiret
 - Un nombre correspondant a la résistance minimale a la rupture par traction en MPa.
- Exemple : **EN- GJL-250**
 Cette fonte a graphite lamellaire possède une résistance a la traction d'au moins 250 Mpa .

Les fontes a graphite sphéroïdale

la désignation de fontes a graphite sphéroïdale est composée de :

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

Exemple : **EN- GJS-500-7**

Cette fonte a graphite sphéroïdale possède une résistance a la traction d'au moins 500 Mpa et une valeur minimale d'allongement de 7%.

Les fontes malléables

la désignation de fontes malléables est composée de :

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

Exemple : **EN- GJMW-450-7**

Cette fonte malléable a cœur blanc possède une résistance a la traction d'au moins 450 Mpa et une valeur minimale d'allongement de 7%

3.5 Désignation normalisée d'autres aciers alliés

- Aciers faiblement alliés

Ce sont des aciers dont la teneur de chaque élément d'addition est inferieur a 5 % et dont la teneur en manganèse est inferieure a 1%

Ces aciers sont désignés par :

- Un chiffre représentant le centuple de la teneur en carbone.
- Les symboles chimiques des elements d'alliage dans l'ordre decroissant de leur teneur.
- Les teneurs des éléments d'alliage sont multipliés par un facteur dépendant du matériau.

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

Si l'acier est moule, la désignation est précédée d'un G

Exemple :

20MoCr5

- Acier faiblement allié possède une teneur en carbone de 0,2 % - La teneur en molybdène est de 0,5 %
- Il y a des traces (non quantifiées) de chrome.

G18NiCrMo6

- Acier faiblement allié est moule et possède une teneur en carbone de 0,18 %
- La teneur en Nickel est de 1,25 % .
- Il y a des traces (non quantifiées) de chrome et de molybdène Aciers fortement alliés

- Aciers fortement alliés

Ces aciers sont désignés par :

- La lettre X
- Un chiffre représentant le centuple de la teneur en carbone.
- Les symboles chimiques des éléments d'alliage dans l'ordre décroissant de leur teneur.

- Les teneurs des éléments d'alliage séparées par un trait d'union.

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

Exemple : **X6 Ni Cr Ti 17-12**

- Cet acier fortement (X) allié possède une teneur en carbone de 0,06 %
- Il est allié à du nickel (Ni) du chrome (Cr) et du titane (Ti).
- La teneur en nickel est de 17 % (17).
- La teneur en chrome est de 12 % (12).
- Il y a des traces (non quantifiées) de titane.

Chapitre 4 : Traitement thermique et traitement thermochimique de diffusion

I. Traitements thermiques

Les traitements thermiques sont constitués par un certain nombre d'opérations combinées de chauffage et de refroidissement ayant pour but :

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

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

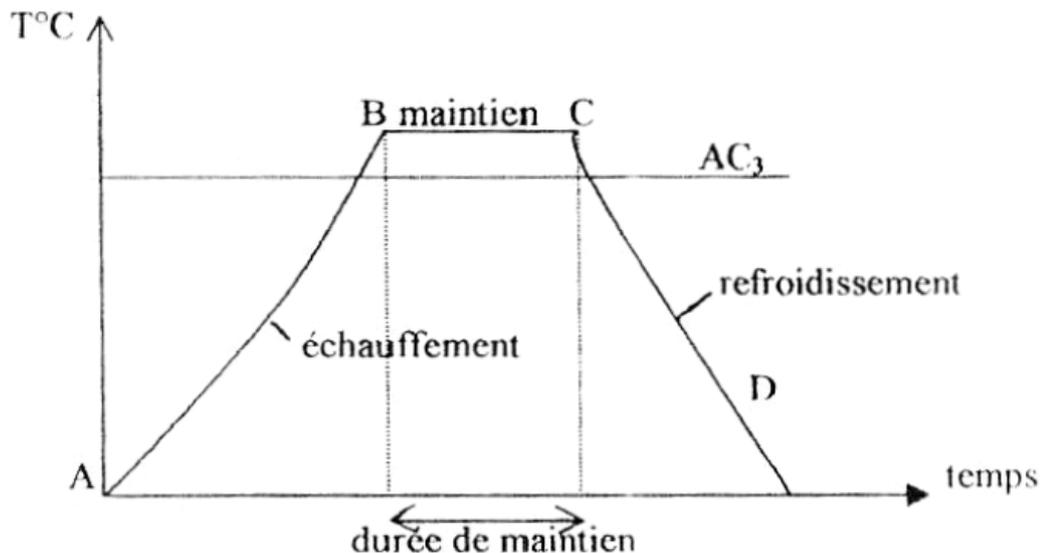
- Augmentation de la dureté, permettant à des pièces de mieux résister à l'usure ou aux chocs.

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

c. De supprimer les tensions internes (écrouissage) des matériaux avant d'être soumis à une déformation plastique à froid (emboutissage, fluotournage).

1. Définitions et procédés des traitements thermiques

Effectuer un traitement thermique sur une pièce, c'est faire subir à celle-ci une variation de la température en fonction du temps. Le procédé de traitement thermique se compose de :



- AB : L'échauffement à des températures supérieures aux températures de transformation (par exemple : AC_3).

- BC : Maintient à une température définie.

- CD : Refroidissement avec une vitesse donnée :
 - lente (dans le four, à l'air).
 - Assez rapide (dans l'huile).
 - Très rapide (dans l'eau).

2. Le recuit

Il permet de se débarrasser de certains états hors équilibre. Il y a quatre grands types de recuits.

2.1. D'adoucissement

Cela permet d'abaisser la dureté du matériau. Cela est utile pour la mise en œuvre à froid.

2. 2. De normalisation

Le but est d'avoir une structure avec de très fins grains bien répartis dans tout le matériau qui a subi un maintien à haute température (moulage, forgeage...).

2. 3. De détente (ou stabilisation ou relaxation)

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

2. 4. D'homogénéisation

Sert à limiter les inhomogénéités chimique qui se trouvent dans le solide. Le recuit à lieu de 950 à 1200°C puis est suivi par un refroidissement de 20 à 60°C par heure

3. La trempe et revenu

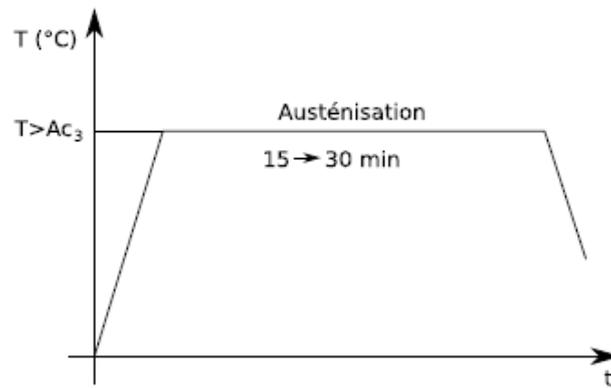
3.1. la trempe

Contrairement au recuit d'adoucissement, le but de la trempe est augmenter la dureté du matériau.

On va chauffer à très haute température et on refroidit très brutalement, en fait plus vite que la diffusion naturelle.

Les trois facteurs de trempe sont :

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



Austénitisation

- La vitesse de trempe, le refroidissement doit être suffisamment rapide pour permettre l'augmentation de dureté. Ainsi le constituant caractéristique de la trempe est la martensite (c'est de l'austénite transformée grâce au refroidissement rapide du matériau).

De plus on peut classer par ordre de vitesse croissante les constituants formés grâce à la trempe :

Perlite < Troostite < Bainite < Martensite

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

La trempabilité est l'aptitude d'un acier à augmenter sa dureté par trempe.

Certains aciers alliés sont tels qu'un refroidissement lent à l'air provoque la martensite : on dit qu'ils sont autotremnants.

3. 2. Le revenu

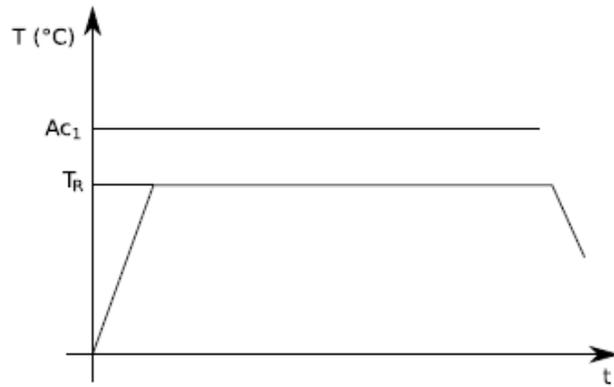
Le revenu est un traitement thermique qui suit la trempe.

On effectue un revenu immédiatement après la trempe sur les pièces complètement refroidies

pour être certain que la transformation martensitique est terminée (On chauffe et on refroidit là aussi mais beaucoup plus brutalement que la trempe.) . En effet la structure martensitique créée lors de la trempe donne une certaine fragilité à la pièce.

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

Le revenu consiste à chauffer une pièce à une température inférieure à 723°C , on maintient cette température puis on refroidit.



Cycle de revenu

Le but du revenu est :

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

Le revenu fait chuter considérablement la dureté d'une pièce, pour limiter ce phénomène il

faut maintenir la température (environ une heure).

On peut aussi effectuer un revenu de détente qui a pour but d'éliminer les contraintes dues à la

trempe, il s'effectue à une température comprise entre 100 et 200°C.

II. Traitements thermochimiques

Le traitement thermochimique ou trempe superficielle permet d'obtenir une grande dureté en surface tout en conservant un bon allongement et une bonne ductilité du cœur de la pièce.

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

1. La cémentation

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

Mais pour effectuer une cémentation il faut :

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

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

Par exemple les aciers non alliés (C10- C20), les aciers au CrMo (18CrMo4) ou les aciers au NiCr (20NiCr6).

2. La nitruration

La nitruration est un traitement thermochimique de diffusion de l'azote atomique dans le fer.

Elle permet :

- D'augmenter la dureté en surface.
- D'augmenter la résistance à l'usure et au grippage.
- D'augmenter la limite d'endurance.
- D'augmenter la résistance à la corrosion.

Elle a lieu à environ 500°C, sur une profondeur allant de quelques dizaines de microns (jusqu'à HV1300) à quelques dixièmes de millimètres (de HV400 à HV900).

Les différentes nitrurations sont :

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

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

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

Les aciers de nitruration gazeuse ou liquide doivent contenir de l'aluminium ou du chrome (30CrMo12- 30CrAlMo6-12),

3. La carbonitruration

La carbonitruration consiste à cémenter simultanément l'acier par du carbone et de l'azote. Néanmoins elle est essentiellement une cémentation et non une nitruration.

L'azote permet de réduire la température de la cémentation (car diminution de la température de formation de l'austénite) donc économie d'énergie, ainsi elle a lieu entre 600 et 880°C.

Le durcissement de la couche carbonitrurée (0.1 mm) est obtenu par une trempe directe (on effectue la trempe directement à partir de la température de carbonitruration), ainsi la dureté atteint HV850.