



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي  
جامعة وهران للعلوم والتكنولوجيا محمد بوضياف

République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de l'Enseignement Supérieur Et de la Recherche Scientifique  
Université des Sciences et de la Technologie d'Oran Mohamed BOUDIAF

**Faculté de Génie Mécanique**

**Département des Mines et Métallurgie**

**METALLURGIE**

**COURS ET EXERCICES CORRIGES**

Réalisé par :

**Mr. BELAHOUEL Mohamed**

Destiné aux étudiants du L3 – LMD Métallurgie

**Année Universitaire 2016/2017**

# Métallurgie : Cours et exercices corrigés

---

## AVANT- PROPOS

Au cours de ces dernières années la science métallurgique a fait d'énormes progrès. L'histoire de l'humanité a plus de mille ans. Tout au long de la période de notre existence un rôle important a été joué par l'homme, par sa capacité de créer et produire. Il est donc logique que l'industrie métallurgique - c'est quelque chose sans laquelle il est impossible d'imaginer notre vie, l'exécution normale des tâches et bien plus encore. Ainsi, la métallurgie est une branche de la science, qui comprend le processus d'obtention de divers métaux à partir de minerais ou d'autres matériaux, ainsi que tous les processus ayant rapport avec la transformation de la composition chimique, les propriétés et la structure des alliages.

Ce polycopié sur la métallurgie s'adresse aux étudiants du L3 LMD métallurgie. Il est le fruit de l'expérience de plusieurs années d'enseignement sur les matériaux et la métallurgie au niveau du département des mines et métallurgie de l'USTO.

Il peut être également utilisé par tout ingénieur ou des étudiants de Master qui s'intéressent à la science des matériaux. Ainsi l'ingénieur a plus que jamais pour obligation de connaître les propriétés de base des matériaux et leur potentiel. Il doit savoir comparer et évaluer avec précisions les propriétés des matériaux.

Quatre grands sujets sont abordés dans ce polycopié :

- Une étude succincte de la structure cristalline des métaux et des alliages
- Les imperfections des cristaux réels et la diffusion à l'état solide
- Les diagrammes d'équilibre des alliages
- Une série d'exercices portant sur les thèmes évoqués ci-dessus.

Enfin nous terminons cet ouvrage par une bibliographie générale et nous espérons qu'il servira de référence pour les étudiants.

## TABLE DES MATIERES

|                   |    |
|-------------------|----|
| AVANT-PROPOS..... | 01 |
|-------------------|----|

### CHAPITRE I

#### STRUCTURE CRISTALLINE DES METAUX ET DES ALLIAGES

##### *Introduction*

|  |    |
|--|----|
| 1.1 Liaisons interatomiques.....   | 05 |
| 1.2 Cristallographie géométrique.....  | 06 |
| 1.3 Réseaux cristallins.....   | 06 |
| 1.4 Notations cristallographiques.....   | 07 |
| 1.4.1 Plans cristallographiques.....   | 07 |
| 1.4.2 Directions cristallographiques.....                                      | 08 |
| 1.4.3 Distance interréticulaire.....   | 09 |
| 1.4.4 Structures cristallines principales des métaux purs et des alliages..... | 09 |
| 1.5 Structure compacte des métaux.....   | 10 |
| 1.5.1 Structures cubiques et hexagonales compactes.....                        | 10 |
| 1.5.1.1 Structure cubique centrée.....   | 10 |
| 1.5.1.2 Structure cubique à faces centrées.....                                | 11 |
| 1.5.1.3 Structure hexagonale compacte.....                                     | 12 |
| 1.6 Sites interstitiels.....   | 13 |
| 1.8 Solutions solides.....   | 14 |
| 1.8.1 Solutions solides de substitution.....                                   | 15 |
| 1.8.2 Solutions solides ordonnées et désordonnées.....                         | 15 |

### CHAITRE II

#### IMPERFECTION DES CRISTAUX REELS

|   |    |
|---|----|
| 2.1 Défauts cristallins.....                      | 17 |
| 2.1.1 Défauts ponctuels.....                      | 17 |
| 2.1.1.1 Lacunes.....                              | 17 |
| 2.1.1.2 Interstitiel.....                         | 17 |
| 2.1.1.3 Atome en substitution.....                | 17 |
| 2.1.2 Défauts linéaires ou dislocations.....      | 18 |
| 2.1.2.1 Dislocation coin.....                     | 18 |
| 2.1.2.2 Dislocation vis.....                      | 19 |
| 2.1.3 Interaction avec des défauts ponctuels..... | 20 |
| 2.1.4 Forces agissant sur une dislocation.....    | 20 |
| 2.1.5 Mouvement des dislocations.....             | 20 |
| 2.1.6 Défauts plans.....                          | 21 |

# Métallurgie : Cours et exercices corrigés

---

|                                    |    |
|------------------------------------|----|
| 2.1.6.1 Les joints de grains ..... | 21 |
| 2.1.6.2 Les joints de macles.....  | 22 |

## CHAPITRE III

### DIFFUSION A L'ETAT SOLIDE

#### Généralités

|  |    |
|--|----|
| 3.1 Aspects macroscopiques de la diffusion ..... | 23 |
| 3.1.1 Diffusion uniforme.....                    | 24 |
| 3.1.2 Diffusion non uniforme .....               | 24 |
| 3.2 Aspects microscopiques de la diffusion.....  | 24 |
| 3.2.1 Mécanismes de la diffusion.....            | 24 |
| 3.2.2 Diffusion aux joints de grains.....        | 25 |

## CHAPITRE IV

### DIAGRAMMES D'EQUILIBREDES ALLIAGES

#### Généralités

|  |    |
|--|----|
| 4.1 Diagrammes d'équilibre binaires .....                                      | 27 |
| 4.1.1 Degrés de liberté d'un système binaire.....                              | 28 |
| 4.1.2 Enthalpie libre .....  | 28 |
| 4.1.3 Démixtion .....  | 28 |
| 4.2 Alliage binaire formé de deux phases en équilibre .....                    | 29 |
| 4.3 Les diagrammes d'équilibre des alliages binaires .....                     | 30 |
| 4.3.1 Les métaux sont entièrement miscibles à l'état liquide .....             | 30 |
| 4.3.2 Alliages à deux solutions solides avec point eutectique .....            | 31 |
| 4.3.3 Alliages à deux solutions solides avec transformation péritectique ..... | 32 |
| 4.3.3.1 Règles de lecture des diagrammes binaires.....                         | 33 |

## CHAPITRE V

### ALLIAGES FER – CARBONE

#### Généralités

|  |    |
|--|----|
| 5.1 Aciers ordinaires recuits .....                          | 36 |
| 5.1.1 variétés allotropiques du fer pur .....                | 36 |
| 5.2 Constituants des aciers recuits.....                     | 36 |
| 5.3 Aciers de construction pour traitements thermiques ..... | 37 |
| 5.4 Désignation des aciers alliés .....                      | 38 |
| 5.4.1 Désignations des aciers fortement alliés .....         | 39 |
| 6.1 Les fontes .....   | 40 |
| 6.1.2 Les fontes blanches .....                              | 40 |

## Métallurgie : Cours et exercices corrigés

---

|   |       |
|---|-------|
| <i>6.1.3 Les fontes grises</i> .....                | 41    |
| <i>6.1.4 Les fontes à graphite lamellaire</i> ..... | 41    |
| <i>6.1.5 Les fontes à graphite sphéroïdal</i> ..... | 41    |
| <i>Exercices</i> .....                              | 43-62 |
| <i>Exercices corrigés</i> .....                     | 64-76 |
| <i>Bibliographie</i> .....                          | 77-78 |

## CHAPITRE I

### STRUCTURE CRISTALLINE DES METAUX ET ALLIAGES :

#### Introduction :

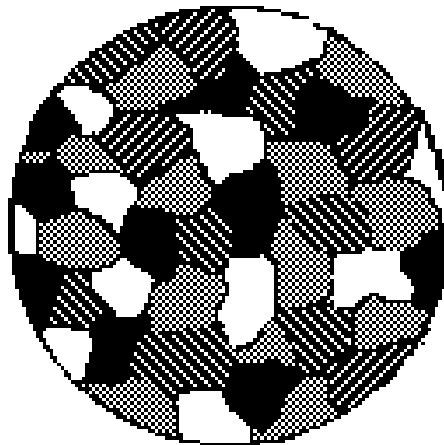
Un métal est formé d'une multitude de petits volumes polyédriques appelés grains dont la taille varie en général de 2 à 20  $\mu\text{m}$ , et qui sont limités par des surfaces appelées **joints de grains**.

Chaque grain est en fait **un monocristal**, c'est-à-dire un empilement régulier d'ions métalliques dont la cohésion est assurée par un gaz d'électrons.

L'orientation du réseau cristallin propre à chaque grain est différente et le matériau est dit **polycristallin**. Dans le cas très particulier où le matériau n'est constitué que d'un seul grain, il est dit monocristallin.

Dans les cas les plus simples (métaux purs, solutions solides) tous les cristaux ont une structure et une composition identiques : le matériau est **monophasé**.

Mais en général le matériau est **polyphasé**, chaque ensemble de cristaux de mêmes structure et composition formant une phase distincte (voir schéma ci-contre).



**Fig.1** Polycristal polyphasé [1]

Les propriétés macroscopiques d'un matériau métallique sont en relation directe avec sa structure à l'échelle cristalline.

#### 1.1 Liaisons interatomiques

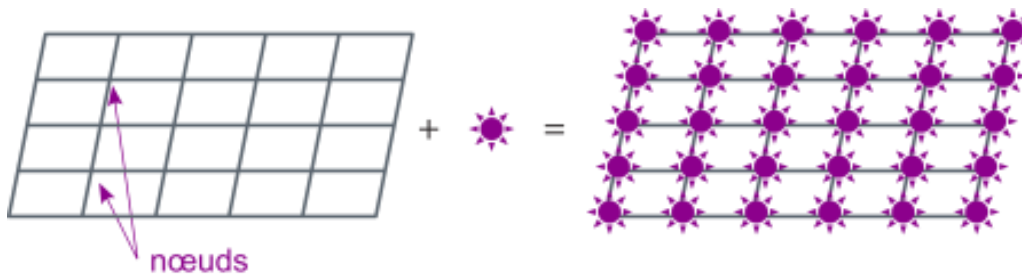
On peut considérer le métal comme un empilement d'ions positifs entouré par un nuage d'électrons libres. Ces électrons libres expliquent par exemple les propriétés de

conductivité thermique et électrique des métaux. De plus, dans le cas des métaux cet empilement d'ions est d'une forte compacité.

## 1.2 Cristallographie géométrique

### 1.3 Réseaux cristallins

Un monocristal géométriquement parfait est un ensemble d'ions régulièrement répartis dans l'espace. Pour décrire cet arrangement, on définit **un réseau cristallin** par un ensemble de nœuds obtenus à partir d'**une maille élémentaire** qui fixe la périodicité tridimensionnelle de répétition d'**un motif élémentaire** (voir schéma ci-contre).



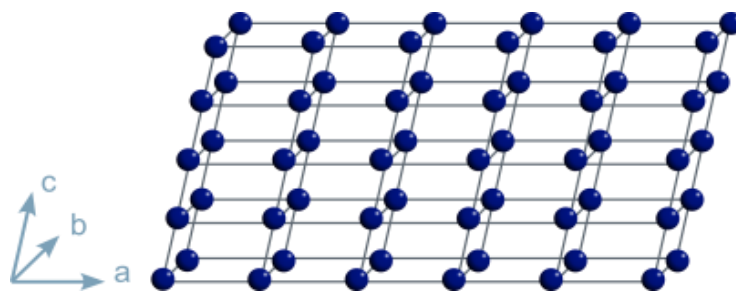
Réseau (Cristallin) + Motif (élémentaire) = Structure cristalline

**Fig.2** Structure cristalline [2]

La maille élémentaire est définie par trois vecteurs  $a$ ,  $b$ ,  $c$ .

Après avoir choisi une origine des axes, la position d'un quelconque des nœuds du réseau est donnée par le vecteur :

$$\vec{r} = u\vec{a} + v\vec{b} + w\vec{c} \quad (u, v, w \text{ entiers})$$



**Fig.3** Réseau cristallin [2]

Tous les réseaux cristallins peuvent être décrits à partir de 7 mailles élémentaires qui définissent les **7 systèmes cristallins** décrits dans le tableau suivant.

| SYSTEME        | $\vec{a}, \vec{b}, \vec{c}$   | EXEMPLES                           |
|----------------|---|------------------------------------|
| Triclinique    | $a \neq b \neq c; \alpha \neq \beta \neq \gamma = \frac{\pi}{2}$        |                                    |
| Monoclinique   | $a \neq b \neq c; \alpha = \gamma = \frac{\pi}{2} \neq \beta$           |                                    |
| Orthorhombique | $a \neq b \neq c; \alpha = \beta = \gamma = \frac{\pi}{2}$              | $U\alpha, Fe_3C$                   |
| Quadratique    | $a = b \neq c; \alpha = \beta = \gamma = \frac{\pi}{2}$                 | Martensite<br>(aciers)<br>(steels) |
| Hexagonal      | $a = b \neq c; \alpha = \beta = \frac{\pi}{2}; \gamma = \frac{2\pi}{3}$ | Zn, Mg, Be                         |
| Rhomboédrique  | $a = b = c; \alpha = \beta = \gamma \neq \frac{\pi}{2}$                 | As, Sb, Bi                         |
| Cubique        | $a = b = c; \alpha = \beta = \gamma = \frac{\pi}{2}$                    | Fe, Cu, Al, Ni                     |

**Tableau 1 : Les 7 systèmes cristallins**

Une structure cristalline est donc parfaitement définie par la connaissance du réseau cristallin ( $\vec{a}, \vec{b}, \vec{c}$ ) et du motif élémentaire ( $X_i, Y_i, Z_i$ ), variant de 1 à N.

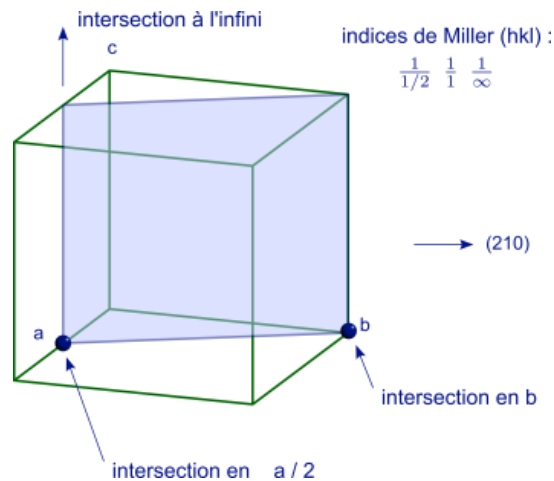
## 1.4 Notations cristallographiques

### 1.4.1 Plans cristallographiques :

#### Indices de MILLER

On appelle **plan cristallographique** un plan qui passe par trois nœuds non alignés du réseau ; ce plan sera désigné par ses **indices de MILLER h, k, l**. En réalité, tout ensemble h, k, l désigne non seulement un plan, mais toute une famille de plans parallèles et équidistants que l'on désigne par : (hkl).

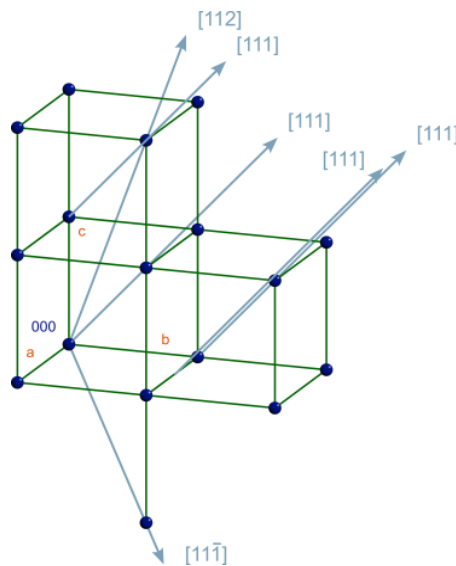




**Fig.4** Indices de Miller [2]

## 1.4.2 Directions cristallographiques

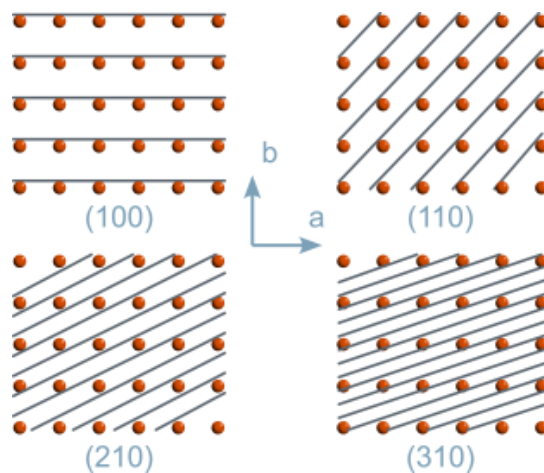
Une droite est dite cristallographique quand elle passe par deux nœuds du réseau, donc par une infinité de nœuds. Comme pour les plans, on définit des séries de droites cristallographiques, parallèles et équidistantes, qui contiennent tous les centres des ions du cristal. Les droites cristallographiques sont évidemment situées dans des plans cristallographiques. Si l'on suppose que la droite passe par l'origine, on peut la désigner par les coordonnées  $u, v, w$  du nœud le plus proche de l'origine (fig.5). Comme pour les plans, un ensemble de coordonnées  $u, v, w$  désignera la famille de droites parallèles à la précédente, que l'on note  $[uvw]$  définissant une direction cristallographique.



**Fig.5** Directions cristallographiques [2]

## 1.4.3 Distance interréticulaire

Les plans de la famille (hkl) sont équidistants. Cette équidistance ou distance interréticulaire notée  $d_{hkl}$  diminue lorsque les indices de MILLER augmentent. Simultanément, la densité diminue.



**Fig.6** Distance interréticulaire [2]

Un calcul de géométrie analytique permet de calculer la distance interréticulaire  $d_{hkl}$  en fonction de h, k, l. L'ensemble des distances interréticulaires d'un cristal est directement mesurable par diffraction (de rayons X par exemple) grâce à la loi de Bragg et permet d'identifier le cristal en question par comparaison avec les banques de données existantes.

Pour le système cubique elle est égale à :

$$d_{hkl} = \frac{a}{\sqrt{h^2 + k^2 + l^2}}$$

Dans le cas de la famille cristalline quadratique, nous avons :

$$d_{hkl} = \frac{a}{\sqrt{h^2 + k^2 + \frac{a^2}{c^2} l^2}}$$

## 1.4.4 Structures cristallines principales des métaux purs et des alliages

Les structures cristallines les plus fréquentes présentées par les métaux purs à l'état solide appartiennent comme le montre le tableau ci-contre aux systèmes cubique et

hexagonal. Trois structures principales y sont représentées : **la structure cubique centrée (cc)**, **la structure cubique à faces centrées (cfc)**, **la structure hexagonale compacte (HC)**.

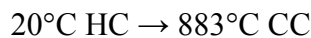
### **REMARQUE :**

Il faut noter que ces structures cristallines très stables sont uniques pour un métal donné à une température fixée mais, pour certains métaux, elles changent lorsque la température varie :

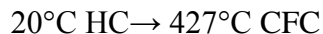
Cas du fer



Cas du Titane



Cas du cobalt



On parle alors de polymorphisme ou d'allotropie et on dit qu'un tel métal change d'état allotropique suivant la température.

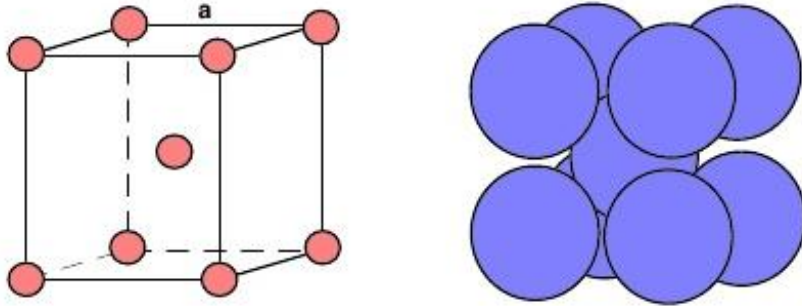
### **1.5 Structure compacte des métaux :**

#### **1.5.1 Structures cubiques et hexagonales compactes**

La liaison métallique est une liaison forte non orientée et les atomes des métaux ont tendance à adopter l'arrangement le plus compact possible avec, comme conséquence, la formation de structures cristallines simples et de haute densité. Dans la maille nous assimilons l'atome à une sphère relativement dure et pratiquement impénétrable. C'est ce modèle qui est généralement adopté pour décrire la structure cristalline des métaux.

#### **1.5.2 Structure cubique centrée (CC)**

La maille est un cube ; les centres des ions se trouvent non seulement aux sommets, mais aussi au centre de chaque cube élémentaire (voir figure 7). Par cube, on compte 2 atomes, chaque ion central comptant pour 1 atome, et chaque ion du sommet pour 1/8 d'atomes puisqu'il est commun à 8 cubes.



**Fig.7** Maille du système cristallin cubique centrée (cc) [3]

**Exemples** de métaux qui cristallisent dans le système cubique centré (CC)

Fer $\alpha$ , chrome, tungstène, molybdène, vanadium. Ce sont des métaux particulièrement **résistants**.

Comme le montre la figure 7, les sphères ioniques sont tangentes le long des diagonales du cube. Le rayon ionique est donc égal à  $a\sqrt{3}/4$  et le long de chaque arête, on a un espace vide égal  $a$  :

$$a - \frac{2a\sqrt{3}}{4} = 0,134 a$$

Le nombre de coordination d'un atome est le nombre d'atomes équidistants de l'atome considéré et qui en sont les voisins les plus proches.

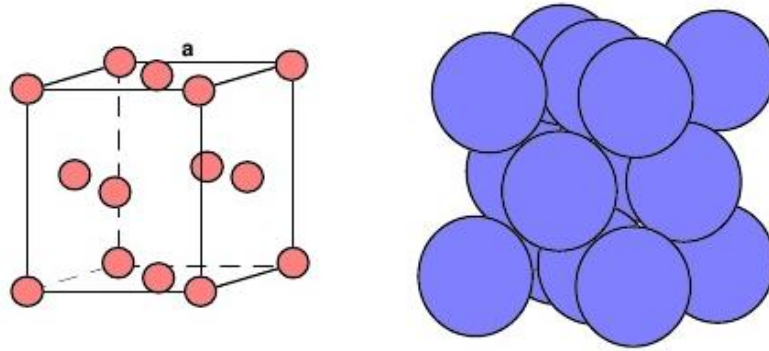
Dans le système cc, le nombre de coordination est égal à 8, ce que l'on établit en considérant l'atome central ou un atome situé à un sommet du cube.

### 1.5.3 Structure cubique à faces centrées

La structure CFC est définie par un motif élémentaire de 4 ions (l'un à l'origine, les 3 autres au centre des faces du cube). La maille élémentaire comprend 4 ions par maille (6 sur les faces appartenant chacun à 2 mailles +8 aux sommets appartenant chacun à 8 mailles).

**Exemples** de métaux qui cristallisent dans le système cristallin cfc :

Fer $\gamma$ , aluminium, nickel, cuivre, argent, or, plomb. La particularité de ces métaux c'est qu'ils sont ductiles et malléables.



**Fig.8** Maille du système cristallin cubique à faces centrées (cfc) [3]

Les sphères ioniques sont tangentes le long des diagonales des faces du cube ; le rayon ionique est donc égal à  $a\sqrt{2}/4$  et le long de chaque arête, on a un espace vide égal à :

$$a - = \frac{2a\sqrt{2}}{4} = 0,293 a$$

Espace qui se trouve à l'intérieur du cube.

Le nombre de coordination est égal à 12, ce que l'on détermine en considérant trois plans trirectangulaires passant par le sommet.

La compacité a pour expression (on note  $r$  le rayon de l'atome considéré, et  $V$  le volume de la maille) :

$$\text{Compacité} = \frac{\text{Volume des atomes}}{\text{Volume de la maille}}$$

La compacité pour une maille cubique à faces centrées est égale à :

$$4 \times \frac{4}{3}\pi \left(\frac{a\sqrt{2}}{4}\right)^3 : a^3 = \frac{\pi\sqrt{2}}{6} = 0.74$$

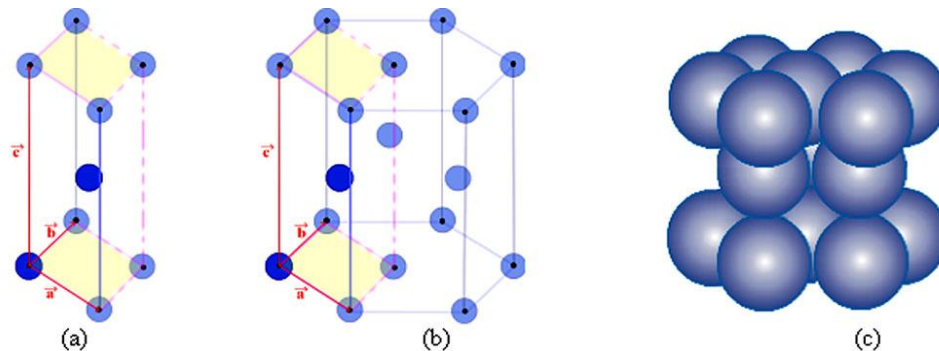
#### 1.5.4 Structure hexagonale compacte

La maille est un prisme droit à base losange (coté  $a$ , angles  $60$  et  $120^\circ$ ), mais on considère généralement comme solide élémentaire l'ensemble de trois de ces prismes et le réseau est formé par la juxtaposition de prismes droits à base hexagonale régulière.

La structure HC est définie par un motif élémentaire de 2 ions. La maille hexagonale représentative comprend 6 ions par maille (3 à l'intérieur +2 sur les bases, communs chacun à 2 maille +12 sur les sommets, communs chacun à 6 mailles).

Tous les métaux à liaison métalliques prononcée cristallisent suivant un des trois systèmes cc, cfc et hc. Il faut souligner que le système cristallin exerce une très grande influence sur les propriétés physiques du métal. En particulier, on observe que les possibilités de déformation plastique sont beaucoup plus restreintes pour les réseaux hexagonaux que pour les réseaux cubiques à faces centrées. Les métaux qui cristallisent suivant le système

hexagonal ( par exemple le Mg) sont plus difficiles à étirer sous forme de fil que les métaux cubiques comme le cuivre et l'aluminium.



**Fig.9** Maille du système cristallin hexagonal compact (hc) [4]

- a) maille élémentaire : prisme droit à base losangique (coté a, angles 60 et 120°)  
Les ronds bleus foncés représentent le motif de la maille hexagonale = atomes (n = 2)
- (b) maille de la structure hexagonale compacte (hc)
- (c) Représentation des atomes

Le réseau est dit compact parce qu'il correspond à l'empilage des atomes le plus dense possible. Le rapport  $c/a$  de la hauteur du prisme au coté de la base est égal à  $1,633\sqrt{8/3}$

Ce rapport est différent du rapport idéal. Voici quelques exemples des valeurs de  $c/a$  :

Mg (1.62) ; Ti (1.59) ; Zn (1.86)

Ces différences de  $c/a$  avec 1,633 peuvent s'expliquer en supposant que le métal est un empilement compact d'ellipsoïdes allongées (Zn) ou aplatis (Be).

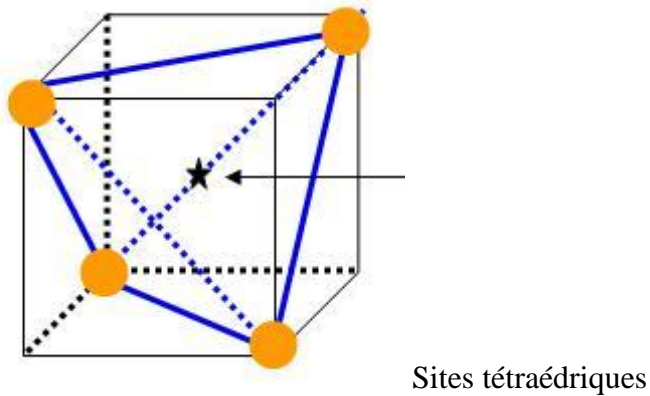
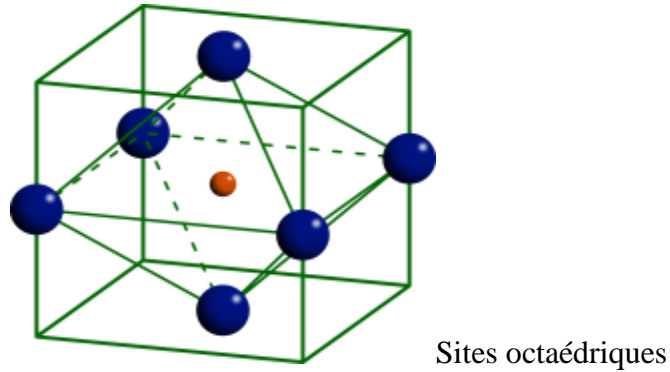
Dans le système hc le nombre de coordination est égal à 12.

La compacité est égale à :

$$6 \times \left(\frac{4}{3}\right) \pi \left(\frac{a}{2}\right)^3 : 6 \times a^2/4\sqrt{3} a \frac{\sqrt{8}}{3} = \pi/\sqrt{2} = \mathbf{0.74}$$

## 1.6 Sites interstitiels

On appelle **sites interstitiels**, les espaces vides situés entre les atomes sphériques dans les réseaux cristallins. Ces sites servent de logements pour les atomes de petit diamètre. Il existe deux types de sites interstitiels : les sites tétraédriques et les sites octaédriques. Les sites octaédriques sont formés par six sphères disposées suivant les sommets d'un octaèdre. Les sites tétraédriques sont formés par empilement compact de quatre sphères dont les centres constituent les sommets d'un tétraèdre.

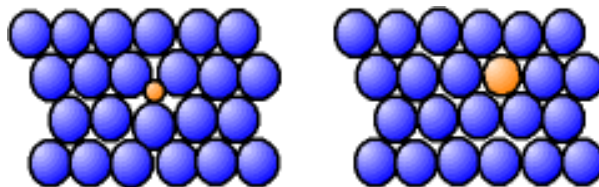


**Fig.10** Sites interstitiels dans la structure cfc [2]

### 1.7 Solutions solides :

Une solution solide est constituée par un mélange homogène de deux éléments différents. L'élément de base A, appelé solvant, l'élément B, appelé soluté, passe dans le réseau. Il y occupe les sites interstitiels ou substitutionnels. On a deux types de solution solide

- En insertion : l'atome étranger se glisse dans les espaces vides, les positions interstitielles, des atomes du cristal
- En substitution : l'atome étranger remplace un des atomes du cristal.



Solution solide interstitielle

Solution solide par substitution

**Fig.11** Différents types de solution solide [5]

## 1.7.1 Solutions solides de substitution

Dans ce deuxième type de solution solide, les atomes du soluté B occupent des sites normalement occupés par des atomes de A dans le métal pur, on obtient ainsi un mélange intime où les atomes des métaux alliés sont assemblés en un édifice cristallin unique.

Exemple : Ag (diamètre 288,3 pm) et Au (diamètre 287,8) ont le même système cristallin c'est-à-dire CFC et ont des diamètres voisins.

### 1- Règles de Hume-Rothery

La solubilité des atomes en substitution peut être plus ou moins prévue par des lois empiriques, connues sous le nom de **règles de Hume-Rothery** (règles qui régissent la formation des solutions) :

1. **Dimensions relatives des atomes**: (règle des 15%). La différence entre les rayons atomiques ne doit pas être supérieure à 15%. La solubilité est faible si l'écart des rayons atomiques dépasse les 15%. Nous pouvons ajouter que la solubilité est inversement proportionnelle à la différence de taille des atomes.

2. **Affinité chimique** : les métaux électroniquement semblables peuvent former des solutions étendues en raison de la similitude de leur liaison.

3. **Différence des électrovalences** : s'ils ont la même valence, ils vont se dissoudre facilement mais les métaux de faible valence dissolvent davantage un métal de valence semblable que ceux de valence élevée.

4. **Type de structure cristalline** : L'analogie des systèmes cristallins est un facteur favorable à l'étendue des solutions solides.

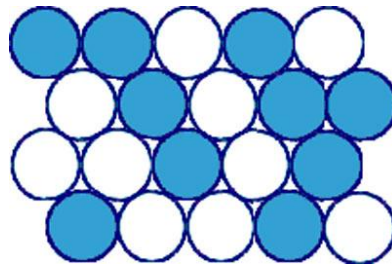
Si tous les facteurs sont favorables, on observe le plus souvent une intersolubilité complète, c'est-à-dire une solution solide quelle que soit la concentration (solution solide illimitée). C'est le cas de l'or et du cuivre.

## 1.7.2 Solutions solides ordonnées et désordonnées

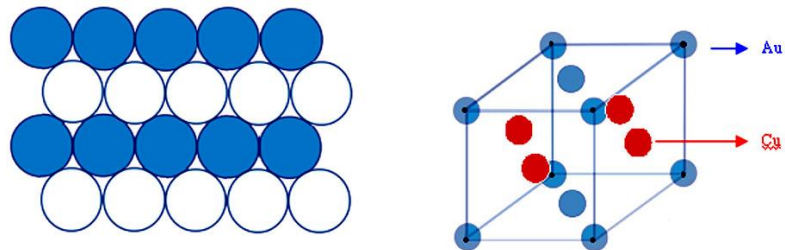
Deux types de solutions solides de substitution peuvent être distinguées :

- Dans les **solutions désordonnées (Figure 11 a)**, les sites de A occupés par des atomes de B sont répartis au hasard.
- A l'opposé, dans les **solutions ordonnées (Figure 11 b)**, les atomes de soluté B sont répartis de façon régulière.





a) Représentation schématique en 2 dimensions  
d'une solution solide (HC) désordonnée



b) Représentation schématique d'une solution solide ordonnée ou superstructure

**Fig.12** Représentation schématique d'une solution solide désordonnée a)  
et d'une solution solide ordonnée b) [6]

## CHAPITRE II

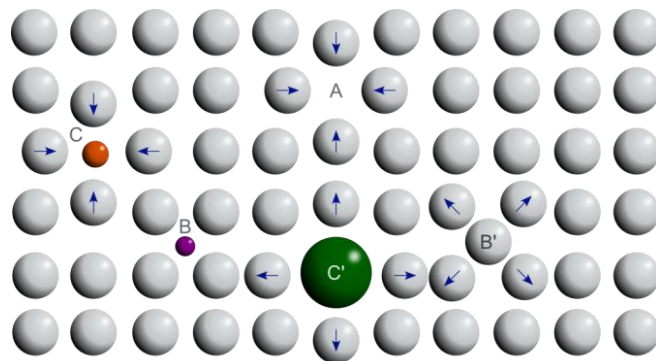
### IMPERFECTIONS DES CRISTAUX REELS

#### 2.1 Défauts cristallins

Les métaux utilisés dans l'industrie ne sont pas constitués de cristaux parfaits (dans lesquels tous les nœuds seraient bien à leur place), ils ne sont généralement pas purs. Les métaux sont souvent utilisés sous forme d'alliages. La présence de ces impuretés (atomes étrangers) dans les métaux va engendrer la déformation du réseau cristallin du fait qu'ils ont un volume différent par rapport au métal de base. Cette situation va engendrer des « erreurs » dans les empilements qui peuvent être décrits comme des défauts **ponctuels**, **linéaires** et **plans**.

##### 2.1.1 Défauts ponctuels

Ce sont des défauts sans dimension qui ont une taille de l'ordre de la distance interatomique. Il existe trois types de défauts ponctuels : les lacunes, les interstitiels et les atomes en substitution, comme cela est décrit sur le schéma suivant.



A- Lacune B- Atome étranger interstitiel B'-Auto-interstitiel  
C et C'- Atomes étrangers en substitution [7]

**Fig.13** Schéma des défauts ponctuels d'un cristal

**2.1.1.1 Lacunes** : Les lacunes sont des vides qui existent quand l'emplacement normal d'un atome (ou de plusieurs contigus) n'est pas occupé. La présence d'une lacune dans le réseau provoque la distorsion de celui-ci ; les atomes proches se déplacent vers le vide ainsi créé pour rétablir un équilibre des forces de liaison. Les lacunes sont en perpétuel mouvement à l'intérieur du cristal du à l'agitation thermique. Ce mouvement se fait grâce à des permutations entre la lacune et les atomes voisins. Les lacunes jouent un rôle fondamental dans la diffusion à l'état solide qui engendre des déplacements d'atomes sur de longues distances et est à la base des traitements thermiques.

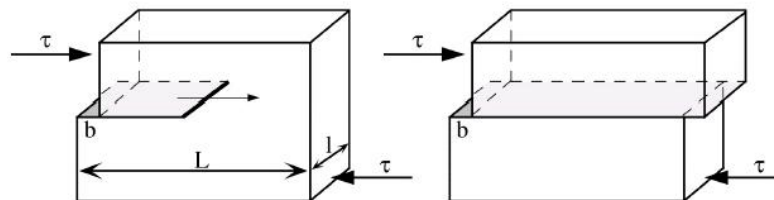
**2.1.1.2 L'interstitiel :** apparaît lorsqu'un atome étranger de petite taille (B) s'insère dans les espaces vides du réseau cristallin. Lorsqu'un atome constitutif du cristal est placé en insertion, nous avons un atome auto-interstitiel (B').

**2.1.1.3 L'atome en substitution :** lorsqu'un atome du réseau du métal de base est remplacé par un atome étranger (C, C').

## 2.1.2 Défauts linéaires ou dislocations

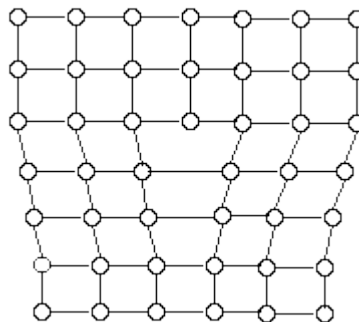
Ces défauts appelés dislocations sont des perturbations importantes du réseau cristallin. Ils sont à l'origine de tous les processus liés à la déformation plastique. On distingue deux types de dislocations : **dislocation coin** et **dislocation vis**

### 2.1.2.1 Dislocation coin :

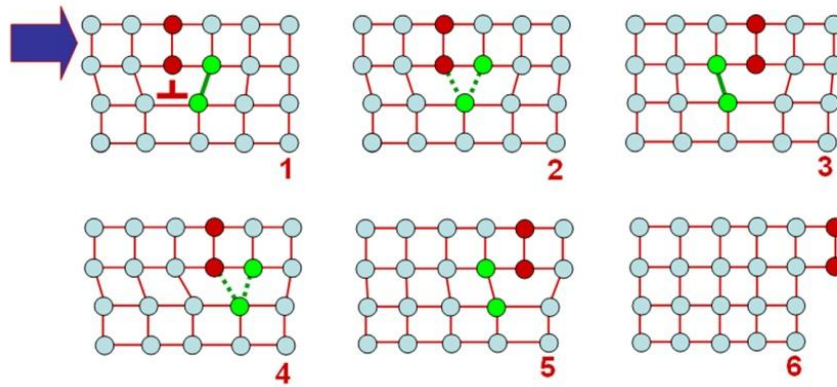


**Fig.14** Une dislocation coin du point de vue des milieux continus (c'est-à-dire en faisant abstraction des atomes) [8]

La figure 14 présente une dislocation coin du point de vue des milieux continus (c'est-à-dire en faisant abstraction des atomes). On crée une telle dislocation dans un bloc de matériau en coupant le bloc jusqu'à la ligne marquée par un trait gras, puis en déplaçant le matériau sous le plan de coupure par rapport à celui du dessus d'une distance  $b$  (une distance interatomique) dans la direction perpendiculaire à la coupure trait gras, enfin en recollant les parties déplacées. Le résultat à l'échelle atomique est présenté sur la figure 15. Le matériau du milieu de bloc contient à présent un demi-plan atomique dont la bordure inférieure est la ligne en gras, la ligne de la dislocation. Ce défaut s'appelle une **dislocation coin**. Son symbole est  $\perp$



**Fig.15** Une dislocation coin avec représentation des atomes au voisinage de la dislocation [9]

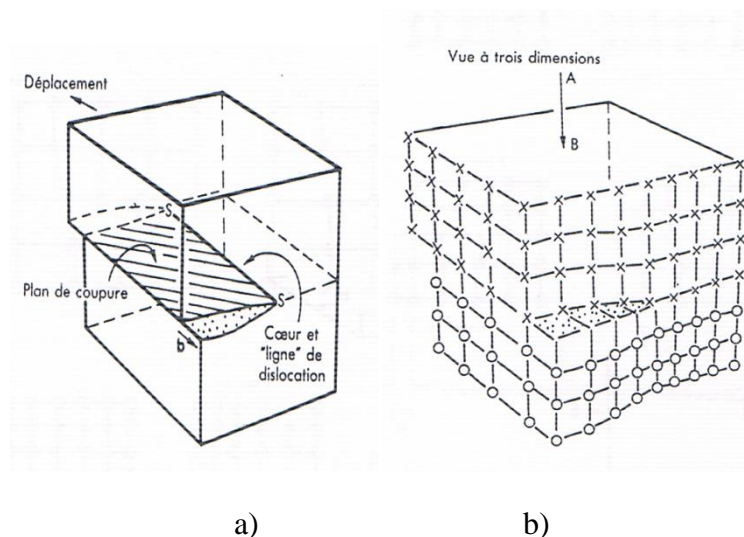


**Fig.16** Déplacement d'une dislocation dans un cristal. Le schéma montre comment les liaisons atomiques du cœur de la dislocation se brisent et se referment pour permettre le mouvement de la dislocation.[10]

Le déplacement des dislocations produit la déformation plastique. La figure 16 montre comment les atomes se réordonnent au passage de la dislocation, et pourquoi la partie inférieure du cristal se déplace d'une distance  $b$  (appelée vecteur de Burgers) par rapport à la partie supérieure lorsqu'une dislocation traverse le cristal de part en part.

### 2.1.2.2 Dislocation vis :

La dislocation vis est représentée schématiquement par la figure 17 ; elle résulte d'un cisaillement de deux portions d'un cristal l'une par rapport à l'autre, effectué le long d'un plan cristallographique. Elle est ainsi appelée parce qu'elle transforme les plans atomiques en une surface hélicoïdale, comme la gorge d'une vis. Comme la dislocation coin, elle crée une déformation plastique en se déplaçant. Ses propriétés sont celles d'une dislocation coin. Toute dislocation d'un cristal est vis, coin ou mixte.



**Fig.17** Une dislocation vis (a) du point de vue des milieux continus, et b) en représentant les positions des atomes [11]

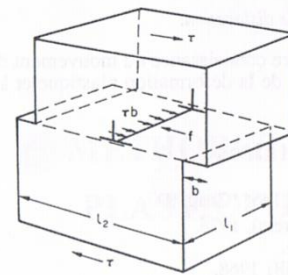
## 2.1.3 Interaction avec des défauts ponctuels

Les dislocations attirent les atomes ne faisant pas partie du réseau (atomes étrangers : impuretés ou éléments d'alliage). Si ces atomes étrangers sont mobiles, ils migrent vers les dislocations et constituent un « nuage de Cottrell ». Ce nuage de Cottrell gêne le mouvement des dislocations, ceci explique que les métaux purs sont plus ductiles que les alliages.

## 2.1.4 Forces agissant sur une dislocation

Une contrainte de cisson ( $\tau$ ) exerce une force sur une dislocation et la déplace à travers le cristal. Pour que la déformation plastique se produise, cette force doit être suffisamment grande pour vaincre la résistance au mouvement de la dislocation. Cette résistance est due à une friction interne, qui s'oppose au mouvement des dislocations ; par ailleurs, l'alliage ou l'écroutissage du matériau y contribuent aussi. La valeur de la force est  $\tau \cdot b$  par unité de longueur de la dislocation. Le travail effectué par la contrainte appliquée lorsque la dislocation traverse le cristal de part en part est égal au travail de la force  $f$  qui s'oppose au mouvement.

**Fig.18** La force agissant sur une dislocation [11]

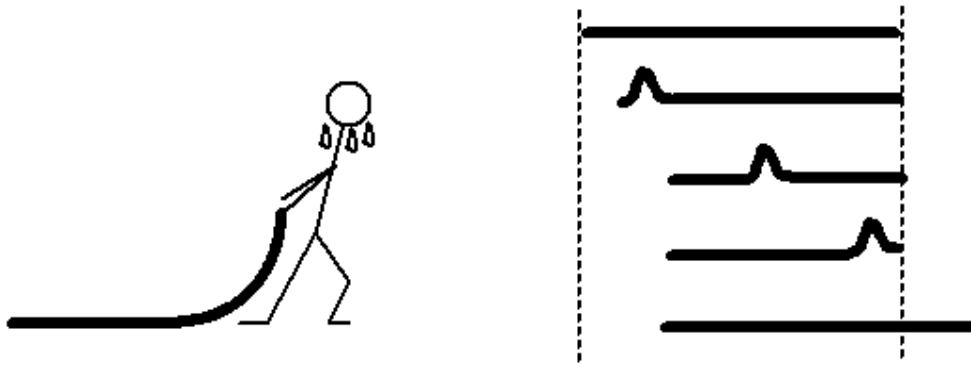


La partie supérieure se déplace d'une distance  $b$  par rapport à la base, et le travail effectué par la contrainte appliquée vaut  $\tau l_1 l_2 b$ . En traversant le cristal, la dislocation de longueur  $l_1$  se déplace d'une distance  $l_2$  en surmontant la résistance  $f$  par unité de longueur ; son travail est  $f l_1 l_2$ . L'égalité des deux travaux aboutit à :  $\tau b = f$ . Ce résultat est valable pour une dislocation coin, vis ou mixte.

## 2.1.5 Mouvement des Dislocations

Le processus de déplacement des dislocations dans leurs plans de glissement constitue la base du mécanisme de la déformation plastique à basse température ( $T < 0,4 T_m$ ) dans la plupart des matériaux cristallins (métaux).

La déformation plastique est facilitée par la présence des dislocations. Elle est induite par la propagation des dislocations. Pour se représenter leur mouvement, on peut utiliser l'image d'un lourd tapis que l'on voudrait déplacer sur le sol.



**Fig.19** La propagation d'un pli le long d'un tapis, analogue du mouvement d'une dislocation coin.

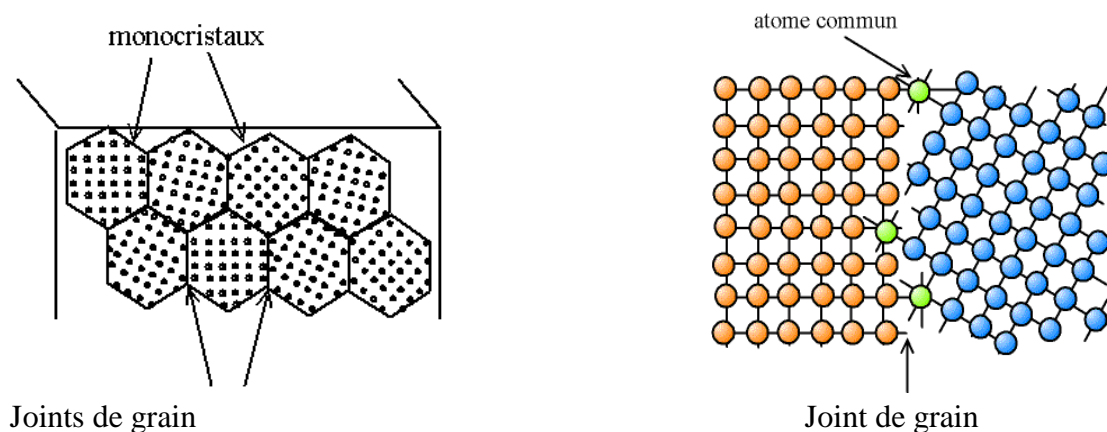
Deux méthodes sont utilisables : soit tirer le tapis pour le faire glisser, soit créer une ondulation à un bord et la faire propager à travers le tapis. La première méthode correspond au cas d'un glissement suivant un plan compact, la seconde donne une image de la propagation des dislocations dans les cristaux.

## 2.1.6 Défauts plans

Il existe un certain nombre de défauts plans parmi lesquels nous pouvons citer ceux ayant une importance particulière à savoir :

### 2.1.6.1 Les joints de grains :

Ce sont les zones de grand désordre (ayant une épaisseur de l'ordre de quelques distances interatomiques) séparant les cristaux dans un même solide polycristallin (Figure 20)



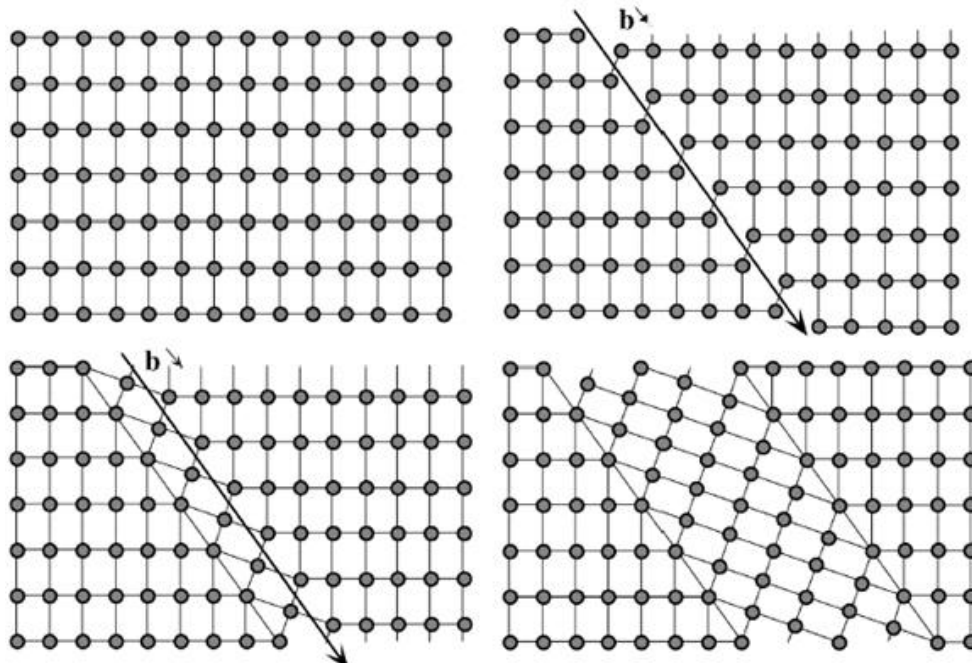
**Fig.20** Description d'un joint de grain [12]

Les matériaux cristallins utilisés couramment, sont généralement polycristallins. Ils ne sont pas formés d'un seul grain (monocristal) mais d'un ensemble de grains de taille plus ou moins grande (de 1  $\mu\text{m}$  à plusieurs centimètres selon le mode d'élaboration et les traitements subis par le matériau). Ces grains sont juxtaposés et les régions où les différents

grains sont en contact sont appelés les joints de grains. Ces régions sont des zones de transition caractérisées par des structures plus ou moins perturbées qui permettent l'accommodation géométrique et cristallographique des grains constitutifs du polycristal. De manière générale, les joints de grains sont à la fois des sources et des pièges pour les défauts ponctuels et les dislocations.

### 2.1.6.2 Les joints de macles :

Un joint de macle est un plan (dans lequel les nœuds restent correctement ordonnés selon le système cristallin du métal) de part et d'autre duquel les réseaux des deux cristaux sont symétriques (et non plus alignés comme ce serait le cas dans un cristal unique). Les macles apparaissent fréquemment au cours de la déformation plastique des métaux CFC. Le maillage se rencontre souvent dans les cristaux hexagonaux, car ceux-ci possèdent moins de possibilités de glissement que les cristaux cubiques.



**Fig.21** Maillage [13]



## CHAPITRE III

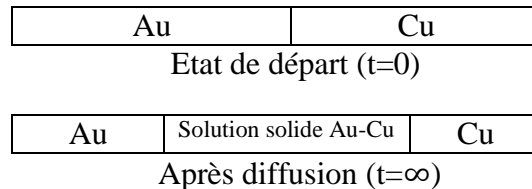
### DIFFUSION A L'ETAT SOLIDE

#### Généralités :

Si l'on maintient en contact deux blocs de cuivre et d'or et que l'on porte l'ensemble à 1000 °C, on peut observer au bout d'un certain temps la soudure de ces deux blocs. La mesure de la concentration de l'un des éléments en fonction de la distance  $x$  montre que les atomes de Cu se sont déplacés du côté de l'or et que réciproquement des atomes d'or se sont déplacés du côté du Cu (voir figure 22). Cette migration d'atomes dans le réseau cristallin s'appelle **diffusion**.

Ce phénomène a des applications et des conséquences très importantes :

Tous les changements de phase (à l'exception de la transformation martensitique, les processus d'homogénéisation, de traitement superficiel (cémentation etc...))



**Fig.22** Expérience de diffusion

#### 3.1 Aspect macroscopique de la diffusion :

Les lois macroscopiques de la diffusion sont analogues à celles que l'on établit pour la conduction électrique ou thermique. En diffusion ce sont les lois de Fick. Si l'on considère tout d'abord un flux d'atomes traversant une surface perpendiculaire à la direction  $x$  par unité de surface et par unité de temps, on note que la densité de ce flux  $J$  est proportionnelle au gradient de concentration. D'où la première loi de Fick :

$$J = - D \cdot (\delta C / \delta x)$$

Où :

$J$  = flux de particules,

$C$  = concentration,

$X$  = distance selon la direction choisie

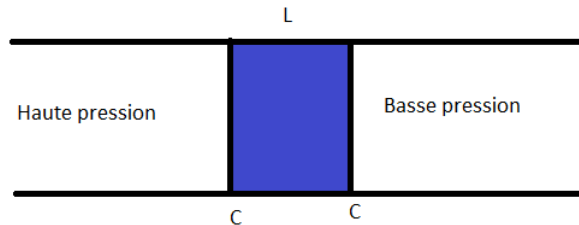
Le coefficient de proportionnalité  $D$  ou coefficient de diffusion s'exprime en  $m^2/s$

Cette relation rend compte du fait que les atomes diffusent des régions de concentration élevée vers les régions de concentration faible. Selon que le gradient de concentration est indépendant du temps ou qu'il dépend de celui-ci, la diffusion est dite uniforme ou non uniforme.



### 3.1.1 Diffusion uniforme :

Ce cas peut-être représenté par un gaz ( $H_2$ ) traversant une feuille métallique de chaque coté de laquelle une forte pression et une faible sont maintenues (voir figure 23)



**Fig.23** Diffusion uniforme d'un gaz à travers une feuille métallique

La concentration du gaz dans le métal est égale à  $C_2$  du coté de la forte pression et à  $C_1$  du coté de la faible pression. En appliquant la loi de Fick, on peut montrer que la quantité de gaz traversant le métal par unité de temps est :

$$Q = J.S = D \cdot \frac{C_2 - C_1}{L} \cdot S$$

Où :

$S$  – surface de la feuille

$L$  – épaisseur de la feuille

### 3.1.2 Diffusion non uniforme :

**Equation :** C'est le cas présenté en introduction (voir figure 22) où le gradient de concentration varie avec le temps et la distance  $X$ . C'est le cas général des problèmes rencontrés en métallurgie. On peut montrer toujours en considérant que  $D$  est indépendant de la composition, que :

$$\frac{\partial n}{\partial t} = D \frac{\partial^2 n}{\partial x^2}$$

C'est la deuxième loi de Fick.

## 3.2 Aspect microscopique de la diffusion:

**3.2.1 Mécanismes de la diffusion:** Le mouvement des atomes se produit grâce à leur vibration thermique, dont l'amplitude augmente avec la température. Plusieurs mécanismes de déplacement des atomes peuvent être imaginés (voir figure 24), mais seuls deux d'entre eux sont possibles:

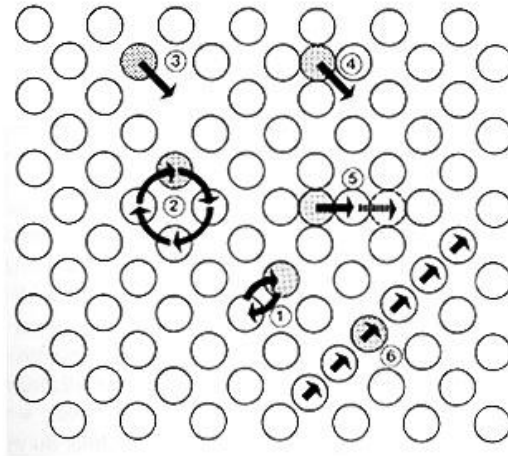


Fig.24 Schéma des principaux mécanismes de diffusion : 1) échange simple ; 2) échange cyclique ; 3) lacunaire ; 4) interstitiel direct ; 5) interstitiel indirect ; 6) « crowdion ».[14]

- le mécanisme interstitiel concerne les atomes de petites dimensions (C, H, O, N, B)
- le mécanisme lacunaire pour les autres

Lorsque la diffusion s'opère suivant ces deux mécanismes, on parle de **diffusion en volume**.

Le coefficient de diffusion croît avec la température et est déterminé à l'aide de la formule suivante:

$$D = D_0 \cdot \exp(-\Delta H / RT)$$

Où:

$D_0$  = constante reliée à la fréquence du saut,

$R = 8,314 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$

$T$  = température en degré kelvins (K)

$\Delta H$  = Enthalpie d'activation molaire en joules par moles ( $\text{J} \cdot \text{mol}^{-1}$ )

### 3.2.2 Diffusion aux joints de grains:

La diffusion en volume dans les cristaux peut-être parfois court-circuitée par la diffusion le long des joints de grains. Le joint de grain se comporte comme un canal plan de deux distances interatomiques environ, avec un coefficient de diffusion qui peut localement être  $10^6$  fois plus grand que celui du volume.

- La diffusion est plus rapide dans les joints de grain, puisqu'il y a plus de place pour circuler ;
- de même que pour les surfaces libres, l'énergie des atomes des joints de grain est plus importante que celle des atomes au sein du cristal,

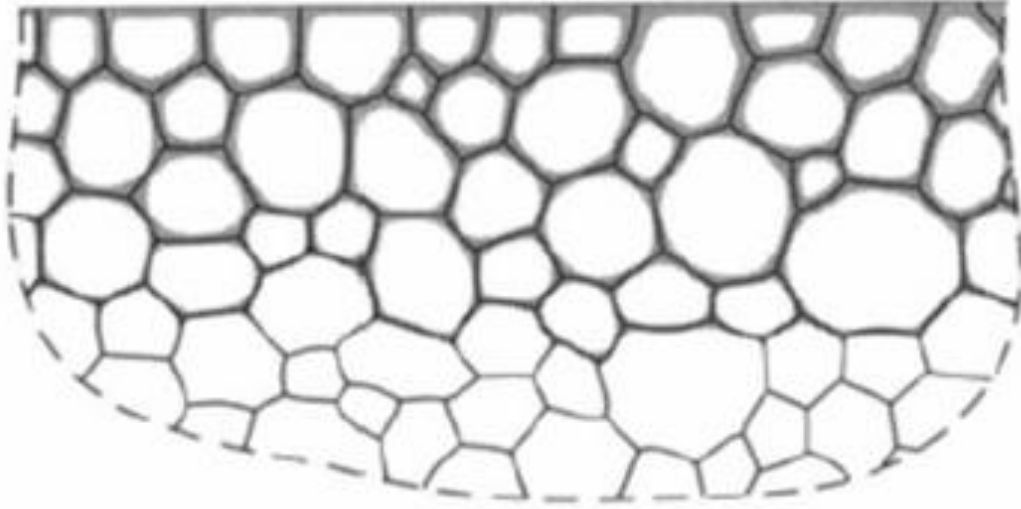


Fig.25 Diffusion au joint de grains [31]

## CHAPITRE IV

### DIAGRAMMES D'EQUILIBREDES ALLIAGES

#### Généralités

Un alliage peut exister sous différents états : **solide cristallisé**, en agrégat de microcristaux appelés grains, souvent de variétés cristallines distinctes, ou **liquide** ou **gazeux**. Ces différents états représentent les diverses **phases** contenues dans l'alliage et qui peuvent changer en fonction des conditions imposées à ce « **système thermodynamique** », principalement la **composition chimique** et la **température**, mais aussi la **pression**. Pour des conditions fixées, il faut un certain temps de maintien à haute température pour stabiliser le système alliage dans un état apparemment définitif, qui s'identifie à l'**équilibre thermodynamique stable** du système. Mais il existe aussi des faux équilibres, appelés **métastables**. Pour réaliser l'équilibre, il est nécessaire que tous les atomes des constituants puissent se déplacer à l'intérieur de toutes les phases : c'est ce que l'on appelle la **diffusion chimique**. Dans les liquides et les gaz, la diffusion est généralement active et rapide mais, dans les phases cristallisées, il faut dépasser une certaine « température de diffusion » pour obtenir le mouvement interne des atomes, qui s'effectue par permutation avec les sites vacants sur le réseau cristallin. C'est l'expérience qui permet d'observer les phases coexistantes dans un alliage, en fonction de la composition chimique, de la température de réalisation de l'équilibre, voire de la pression appliquée. C'est également l'expérience qui permet de déterminer les lignes des transitions de phases sur lesquelles apparaissent ou disparaissent certaines d'entre elles. La description des équilibres de phases se fait souvent en supposant la pression fixée et en utilisant comme variables les teneurs des constituants et la température. Par exemple pour un alliage binaire, on porte en abscisse la concentration moyenne d'un des deux constituants et en ordonnée la température. Une telle représentation est appelée **diagramme binaire d'équilibre de phases**. L'existence même des diagrammes d'équilibre découle des lois générales de la thermodynamique chimique. Les diagrammes d'équilibre de phases représentent donc, dans des conditions prévisibles par la thermodynamique, les domaines d'existence à l'équilibre des diverses phases qui se forment dans le système en fonction de sa composition chimique et des paramètres externes qui lui sont imposés. Ils permettent une visualisation rapide de l'état du système. Les diagrammes d'équilibre constituent donc le document de base des métallurgistes, outil indispensable que l'on consulte en priorité. De même, les diagrammes de phases ne donnent aucune indication sur les défauts de structure dans les solides tels que les joints de grains, les dislocations ou les défauts ponctuels.

#### 4.1 Diagrammes d'équilibre binaires

Les variables intensives qui définissent un système à 2 constituants A et B sont :

1. La température
2. Les concentrations  $X_A^i$  de l'élément A dans chacune des phases i.
3. La pression est fixée.

## 4.1.1 Degrés de liberté d'un système binaire.

La règle des phases nous donne la variance du système :

$$V = C + 1 - \varphi = 3 - \varphi \quad \text{avec } (C=2)$$

- a) Si le système est formé que d'une phase,  $V=2$ . Le système a deux degrés de liberté, la température  $T$  et la concentration  $X_A$  peuvent varier indépendamment.

Dans le diagramme d'équilibre, les points représentatifs de cette phase recouvrent une aire qui correspond au domaine d'existence de cette phase.

- b) Si le système est formé de deux phases ; alors  $V=1$ . Le système a un degré de liberté et comme il est décrit par trois variables, on a donc deux relations entre ces trois variables :

$$X^1_A = f_1(T) \text{ et } X^2_A = f_2(T)$$

Dans le diagramme d'équilibre, les deux points qui représentent un système binaire biphasé s'alignent sur 2 courbes et limitent le domaine d'existence biphasé.

- c) Si le système est triphasé, la variance est nulle :  $V=0$ . Ce système ne peut exister que pour une valeur particulière des variables :

$$T=T_0, X^1_A=X_0, X^2_A=X'_0 \text{ et } X^3_A=X''_0.$$

Le système est représenté dans le diagramme d'équilibre par 3 points sur une même horizontale.

- d) Comme la variance ne peut être négative ; dans un système binaire, il ne peut exister simultanément plus de trois phases en équilibre.

## 4.1.2 Enthalpie libre.

Si on connaît la fonction enthalpie libre  $G(T, P, X_i)$  en fonction de la température, la pression et les concentrations, la thermodynamique permet de prévoir les conditions de stabilité d'un système.

En particulier, lorsque plusieurs phases peuvent coexister, on peut en déduire les fonctions  $G(T, P, X_i)$  correspondantes aux conditions d'équilibres entre ces phases pour les construire :

- $(P, T)$  pour les variétés allotropiques d'un corps pur
- Les diagrammes  $T(X_A)$  pour les phases d'un alliage binaire A-B.

Dans tous les cas, le tracé du diagramme doit obéir à certaines règles topologiques imposées par la thermodynamique. Ces règles simples permettent de dessiner correctement un diagramme à partir de points expérimentaux et de vérifier la cohérence.

## 4.1.3 Démixtion.

C'est le cas le plus simple, car une seule fonction  $G(T, X_i)$  doit être considérée.

### 1) Solution idéale.

Une solution est idéale si l'enthalpie de mélange est nulle et si l'entropie de mélange est l'entropie de configuration d'une solution parfaitement aléatoire.

$$\Delta H_m^{\text{id}} = 0$$

## 4.2 Alliage binaire formé de deux phases en équilibre (une phase liquide et une phase solide par exemple)

### a) Composition chimique des deux phases : règle de l'horizontal

Pour tous les alliages dont la composition varie de  $X_1$  à  $X_2$  à la température  $T$ , la loi des phases donne  $V_r = 2 + 1 - 2 = 1$  (où  $V_r$  est la variance réduite). La température étant fixée arbitrairement, les autres facteurs d'équilibre sont bien déterminés ; donc la composition de chacune des deux phases a une valeur unique.

**D'où la règle :** A la température  $T$ , les titres des phases liquide et solide d'un alliage binaire en équilibre sont donnés par les abscisses des points d'intersection de l'isotherme  $T$  avec le liquidus et le solidus

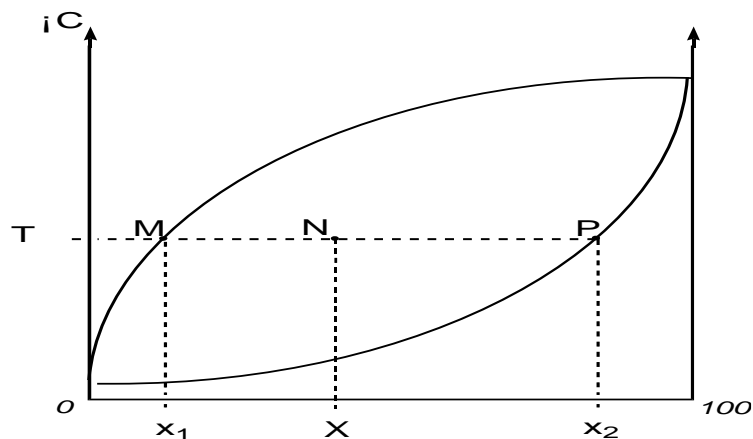


Fig.26 Alliage binaire

### Masse des deux phases en présence : Règle des segments inverses

Soit à calculer les proportions en masses  $L$  et  $S$  des phases liquide et solide en présence à la température  $T$ , pour un alliage contenant la fraction  $m$  de l'élément  $C$ .

La somme de ces proportions est égale à :  $L + S = 1$ .

Ecrivons que la masse de l'élément  $C$  contenu dans l'unité de masse de l'alliage est égale à la somme des masses de cet élément contenu dans chacune des phases :

$$m = Lx_1 + Sx_2$$

De ces deux équations, on tire :

$$L = \frac{s-m}{s-l} = \frac{NP}{MP} \quad \text{et} \quad S = \frac{MN}{MP}$$

La proportion de chaque phase est fonction linéaire du titre de l'alliage.

Remarque : On peut appliquer cette règle sous la forme suivante :  $\frac{L}{S} = \frac{NP}{MN}$

### 4.3 Les diagrammes d'équilibre des alliages binaires

Pour expliquer la lecture des principaux types de diagrammes d'équilibre d'alliages binaires, nous partons tout d'abord de l'état liquide c'est-à-dire des hautes températures pour descendre jusqu'à la température ambiante et ensuite en sens inverse en partant de la température ambiante pour monter jusqu'à la fusion. Nous admettons qu'à l'état liquide la solubilité de A dans M est totale (il en est de même pour M dans A).

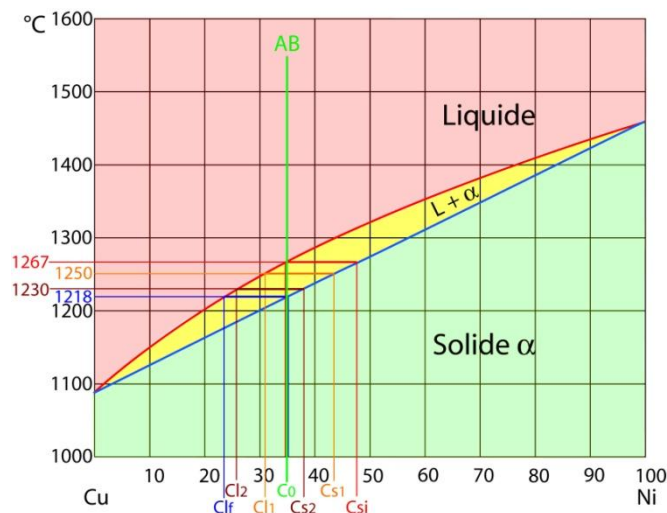
Les divers cas qui peuvent se présenter peuvent-être classés en trois grandes catégories :

- Les métaux sont entièrement miscibles à l'état liquide
- Les métaux sont partiellement miscibles à l'état liquide
- Les métaux sont entièrement immiscibles à l'état liquide

#### 4.3.1 Les métaux sont entièrement miscibles à l'état liquide

##### Alliage a solution solide unique :

Dans le cas d'une solution solide unique, les deux métaux sont entièrement miscibles à l'état solide. Ils forment une seule phase dont le titre en chaque métal peut varier de 0 à 100%. On peut citer le cas des alliages nickel-cuivre.



**Fig.27** Détermination des compositions des phases de l'alliage AB (35% m de nickel), en fonction de la température [14]

Soit un alliage liquide nickel-cuivre à 35% m de nickel représenté par la verticale AB. Etudions son refroidissement. A la température  $T = 1267^\circ\text{C}$ , la solidification commence, il ya dépôt d'une première parcelle solide de titre  $C_{s1}$ ; le liquide s'enrichit donc en cuivre. En continuant à diminuer la température, la masse du solide déposé s'accroît aux dépens du liquide. A  $1250^\circ\text{C}$  par exemple nous avons en présence une phase liquide de titre  $C_{l1}$  et une phase solide de titre  $C_{s1}$ . A la température  $T = 1218^\circ\text{C}$ , la solidification est terminée. La règle de l'horizontale montre que la dernière goutte liquide a pour titre  $C_{lf}$ . En résumé le titre du liquide varie de  $C_0$  à  $C_{lf}$  et celui du solide de  $C_{s1}$  à  $C_0$ .

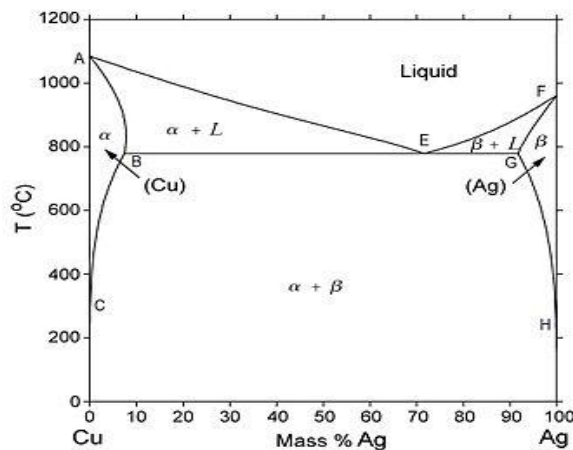
### 4.3.2 Alliages à deux solutions solides avec point eutectique

La particularité de ce diagramme est l'existence d'un point invariant que l'on appelle point eutectique dont la température est inférieure à la température de fusion des deux constituants A et B. A titre d'exemple prenons l'alliage binaire cuivre-argent.

Les deux branches du liquidus se coupent en E; en ce point, trois phases sont présence : le liquide E, et deux solutions solides de titres respectifs B et G. En ce point, un liquide se transforme simultanément en deux phases solides :  $LE \Leftrightarrow \alpha + \beta$

La variance réduite en ce point est alors égale :  $V_r = 2 + 1 - 3 = 0$ . L'équilibre ne peut donc avoir lieu que pour une température bien déterminée; la moindre variation de température entrainera la disparition d'au moins une phase, la phase de titre intermédiaire donnant naissance aux deux autres, ou inversement.

La température de fusion du cuivre est de  $1083^\circ\text{C}$ , celle de l'argent est de  $962^\circ\text{C}$ .



**Fig.28** Diagramme d'équilibre de phases du système Cu-Ag [15]

#### Refroidissement de l'alliage eutectique.

A la température eutectique ( $780^\circ\text{C}$ ), on a l'équilibre suivant :

Liquide E  $\leftrightarrow$  Solution solide B + Solution solide G

L'équilibre se déplace vers la droite si le système cède de la chaleur au milieu ambiant. L'alliage eutectique après solidification est un agrégat c'est-à-dire un mélange hétérogène de



ces deux solutions solides, dont le rapport des masses est donné par la règle des segments inverses.

$$\frac{\text{masse } B}{\text{masse } G} = \frac{EG}{EB}$$

Le titre de la solution solide  $\alpha$  varie entre 0 et B, celui de la solution  $\beta$  entre G et 100%. Les solutions B et G sont les limites respectives des solutions  $\alpha$  et  $\beta$ .

### 4.3.3 Alliages à deux solutions solides avec transformation péritectique

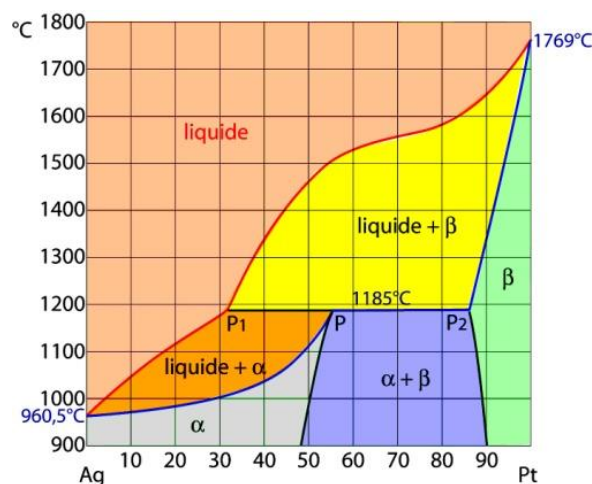
A la température  $T + \varepsilon$  légèrement supérieure à la température T (1185°C), deux phases sont en présence : solution solide  $P_2$  et le liquide  $P_1$ . La proportion du liquide étant  $\frac{P_1P}{P_2P_1}$

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 29) 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 29) 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.

A cette composition, juste au-dessus de 1185°C coexistent deux phases, une phase  $\beta$  solide de composition  $C_\beta = 86\%$  Pt et une phase liquide de composition  $C_1 = 32\%$  Pt. À 1185°C, ces deux phases se transforment brutalement en une seule phase solide  $\alpha$  de composition  $C_\alpha = 55\%$  Pt.



**Fig.29** Diagramme d'équilibre de phases de l'alliage Argent-Cuivre [14]

## 4.3.3.1 Règles de lecture des diagrammes binaires

**Les règles suivantes facilitent la lecture des diagrammes d'équilibre binaires :**

- Un domaine ne peut être occupé que par une phase (solution solide ou un liquide) ou deux phases
- Tout domaine dont le contour comporte une portion horizontale est à deux phases
- Une ligne oblique sépare un domaine à une phase d'un domaine à deux phases, autrement dit lors du franchissement d'une ligne oblique le nombre de phases varie de 1 unité (en plus ou en moins)
  
- Une ligne horizontale définit le « domaine » de coexistence de trois phases. Les domaines à deux phases qui lui sont adjacents sont occupés par deux de ces trois phases ; il ne peut apparaître que trois domaines de ce type :
  - Phase 1 + phase 2
  - Où phase 2 + phase 3
  - Où phase 1 + phase 3

## CHAPITRE V

### ALLIAGES FER – CARBONE

#### Généralités

Les alliages fer-carbone, c'est-à-dire les aciers et les fontes, jouent un rôle capital dans la technologie actuelle. Les alliages fer-carbone sont de deux types ; l'un **stable** Fe-C (graphite) et l'autre **métastable** Fe-Fe<sub>3</sub>C (Cémentite). Pour des aciers dont la teneur en carbone est inférieure à 1% en poids, on peut se limiter à l'étude du **système métastable**, car dans les conditions pratique, il ya toujours formation de cémentite (figure 24). Il présente de nombreuses réactions et transformations :

- réaction eutectique
- réaction péritectique
- réaction eutectoïde
- 2 transformations allotropiques
- un point de curie

Il possède en outre un composé défini : la cémentite

Trois domaines du diagramme sont étudiés :

- Z1 correspond au péritectique et à la transformation allotropique
- Z2 correspond à l'eutectique
- Z3 correspond à l'eutectoïde, la transformation allotropique et le point de curie

#### Zone 1, réactions péritectiques et allotropique

La zone supérieure Z1 (figure 24-b) est caractérisée par :

- la fusion du fer pur à 1538 °C
- par la réaction **péritectique** à 1499°C. A cette température, le liquide à 0.51% de carbone (en masse) + la phase  $\delta$  à 0.09 % de carbone donne lors du refroidissement la phase  $\gamma$  (austénite) à 0.17% de C suivant la réaction :  $\text{Liq} + \delta \rightarrow \gamma$
- la transformation allotropique  $\gamma \leftrightarrow \delta$  à la température de 1392°C. La phase  $\gamma$  de structure cfc se transforme en fer  $\delta$  de structure cc.

#### Zone Z2 réaction eutectique

La zone Z2 correspond au domaine des fontes, elle est caractérisée par :

- par la réaction eutectique à la température de 1147°C. A cette température, le liquide à 4.3 % de C se décompose pour donner simultanément la phase  $\gamma$  à 2.06 % de C et de la cémentite (Fe<sub>3</sub>C) à 6.67 % de C suivant la réaction :  $\text{Liq} \rightarrow \gamma + \text{Fe}_3\text{C}$ . Le

## Métallurgie : Cours et exercices corrigés

---

constituant formé au cours de cette réaction isotherme réversible est nommé **lédéburite**.

- En dessous de 721 °C (palier eutectoïde) on retrouve le domaine  $\alpha + \text{Fe}_3\text{C}$ .

La zone Z3, réactions eutectoïde, allotropique et point de curie

La zone Z3 (figure 24 c) correspond au domaine des aciers, elle est caractérisée par :

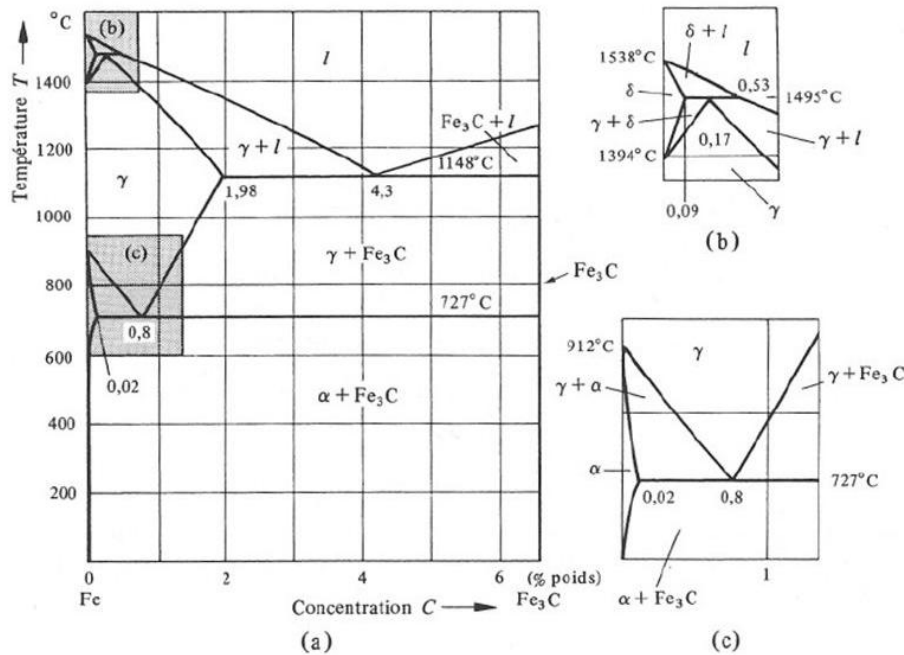
- A 727 °C par la réaction eutectoïde. A cette température, la phase  $\gamma$  à 0.8 % de C se décompose lors du refroidissement, pour donner simultanément la phase  $\alpha$  (ferrite) à 0.02 % C et de la cémentite ( $\text{Fe}_3\text{C}$ ) à 6.67 % de C suivant la réaction :  $\gamma \rightarrow \alpha + \text{Fe}_3\text{C}$ . Celle-ci a les mêmes caractéristiques qu'une transformation eutectique, mis à part le fait que la transformation s'opère à partir d'une solution solide  $\gamma$ , et non d'une solution liquide.

Le constituant lamellaire formé au cours de cette réaction isotherme réversible est nommé **perlite**.

- A 910°C par la transformation allotropique  $\gamma \leftrightarrow \alpha$ . La température de cette transformation est abaissée par l'addition de carbone de 912 °C à 727 °C. La phase  $\gamma$  de structure cfc se transforme en fer  $\alpha$  de structure cc.

### Point de curie :

Le fer pur perd son magnétisme à la température de 770 °C. Il devient paramagnétique. Le paramagnétisme est une Propriété des corps ou des substances paramagnétiques de s'aimanter faiblement dans le sens du champ magnétisant quand ils y sont placés. Cette transformation réversible est observée dans d'autres matériaux et alliages par exemple le Cobalt à la température de 1115°C, l'alliage  $\text{CuOFe}_2\text{O}_3$  etc ...



**Fig.30** Diagramme fer-cémentite (Fe<sub>3</sub>C) : (a) diagramme métastable utilisé pour les aciers et fontes blanches ; (b) détail du domaine d'équilibre péritectique ; (c) détail du domaine d'équilibre eutectique. La concentration en carbone est donnée en % poids.[3]

## 5.1 Aciers ordinaires recuits

### 5.1.1 Variétés allotropiques du fer pur :

On distingue plusieurs formes de fer qui diffèrent par leur magnétisme, leur pouvoir de dissolution du carbone, ou leur structure cristalline.

1° **Fer α.** – Cette forme existe au-dessous de 906°C. Le fer α ne dissout pratiquement pas de carbone (0.02 % au maximum à 721 °C et moins de 0.001 % à 300°C). Il cristallise dans le système cubique centré ; le côté du cube élémentaire est égal à 0.287 mμ à 20 °C. **Ferromagnétique** jusqu'à 770 °C (point de curie), entre 770 et 906°C, le fer α n'est plus **ferromagnétique**.

2° **Fer γ.** – Cette forme existe entre 906 et 1401°C. Le fer γ est **amagnétique**. La solubilité du carbone dans le fer γ croît de 0.85 % à 721°C jusqu'à 1.7 à 1145°C, puis décroît jusqu'à 0.17 % à 1487°C. Il cristallise dans le système cubiques à faces centrées avec un côté égal à 0.363 mμ à 1100°C. Le fer γ est plus dense et plus dilatable que le fer α.

3° **Fer δ.** – Le fer δ existe de 1401°C jusqu'à la température de fusion. Amagnétique, Il cristallise dans le système cubique centré. Le côté de sa maille étant égal à 0.293 mμ à la température de 1425°C.

### 5.2 Constituants des aciers recuits :

**Ferrite.** – La ferrite est constituée par du fer α ne renfermant que des traces de carbone à la température ambiante. Sa solubilité maximale est de 0.02% en masse à 721°C. Après attaque

au Nital, elle se présente sous forme de polyèdres blancs dont les joints de grains apparaissent en foncé. Elle n'est pas très dure ( $HB = 80$ ), peu tenace ( $R_m = 300 \text{ N/mm}^2$ ), mais elle est très ductile ( $A = 35 \%$ ) et très résiliente ( $K = 30$ ). Sa masse volumique est de  $7.86 \text{ kg/dm}^3$ .

**Cémentite.** – Cette combinaison est très dure, mais fragile ( $K \approx 0$ ) ;  $R_m = 700 \text{ N/mm}^2$ . Elle apparaît en blanc après attaque au Nital sans que l'on puisse distinguer les joints de grains. Elle est colorée en rouge brun par le picrate de sodium. Elle donne une très bonne tenue à l'abrasion et à l'érosion.

**Perlite.** – C'est un mélange hétérogène de ferrite et de cémentite à 0.85% en masse de carbone (eutectoïde) qui peut avoir deux aspects : lamellaire ou globulaire (ou coalescée). Elle est très dure ( $HB = 200$ ), tenace ( $R_m = 850 \text{ N/mm}^2$ ) et assez ductile ( $A\% = 10$ ), facile à usiner et offre une assez bonne résistance aux efforts statiques et à l'usure par frottements. Cet eutectoïde se présente généralement sous forme lamellaire (alternance de lamelles de ferrite et de cémentite dont l'épaisseur et les écarts dépendent de la vitesse de refroidissement). A faible grossissement, les lamelles peuvent ne pas être distinctes, on dit alors que la perlite est irrésolue.

**Perlite globulaire ou coalescée :** Petits globules blancs de  $\text{Fe}_3\text{C}$  de contour noir sur fond de ferrite. Cette structure est consécutive à un recuit d'adoucissement.

**Austénite :** C'est une solution solide de carbone (ou de plusieurs éléments) dans le Fer  $\gamma$ , elle peut dissoudre jusqu'à 1.7%. C'est le constituant intermédiaire de durcissement par trempe, après chauffage (austénitisation) et avant refroidissement (trempe). Elle est assez douce et assez facile à usiner. Elle possède un coefficient de dilatation élevé et une bonne résistance à l'usure. Elle possède une bonne résilience aux températures cryogéniques.

### 5.3 Aciers de construction pour traitements thermiques

La composition chimique comporte des valeurs limites en C, Mn, Si et P. On distingue deux nuances :

#### a. Les aciers courants :

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

**Exemple :** CC 35

CC : Acier ordinaire pour traitement thermique. 35 : contenant 0,35 % de carbone.

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

#### b. Les aciers fins :

Ces aciers sont employés lorsque les caractéristiques mécaniques exigées sont sévères et nécessitent des transformations de structure par traitement thermique, leur élaboration s'effectue dans le four Martin. Leur désignation commence par les lettres XC suivis d'un nombre indiquant la teneur en carbone en centième pour cent. Dans cette catégorie d'aciers, les écarts tolérés pour le carbone et les impuretés sont réduits, ces aciers présentent plus de garantie que les aciers courants vis à vis de la teneur en carbone et en impureté

## Exemple : XC 85

XC85 : Acier ordinaire pour traitement thermique, contenant 0,85 % de carbone.  
Leur désignation peut être aussi suivie d'une lettre minuscule indiquant l'indice de pureté comme :

a : pureté minimale.

d : pureté moyenne.

m : pureté maximale.

Exemple de nuances normalisées : XC 10, XC 12, XC 18, XC 35, XC 38, etc.

## 5.4 Désignation des aciers alliés :

On appelle acier allié un acier contenant, en plus du fer et du carbone, un ou plusieurs éléments d'addition en proportions suffisantes pour modifier sensiblement au moins l'une des propriétés de l'acier ordinaire contenant la même teneur de carbone.

On distingue les aciers faiblement alliés et les aciers fortement alliés. Les aciers fortement alliés ont un élément d'addition ayant une teneur supérieure à 5%. Ce sont des aciers de grande pureté.

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

Pour les aciers faiblement alliés nous avons le tableau suivant :

| Facteur multiplicateur | Symbole chimique des éléments         |
|------------------------|---------------------------------------|
| 4                      | Cr, Co, Mn, Ni, Si, W                 |
| 10                     | Al, Be, Cu, Mo, Nb, Pb, Ta, Ti, V, Zr |
| 100                    | Ce, N, P, S                           |
| 1000                   | B                                     |

## Exemple :

30 Cr Ni Mo 8 :

L'absence de symbole devant le chiffre 30, donc nous sommes en présence d'un acier faiblement allié.

Le chiffre 30 veut dire contenant 0.30% de carbone.

Cr, Ni, Mo : Symboles chimiques des éléments d'addition dans l'ordre des teneurs décroissantes.

Teneur du 1er élément d'addition en % x facteur. Avec  $8/4 = 2\%$  de chrome. Nickel et du molybdène en faible teneur (non précisée).

## Métallurgie : Cours et exercices corrigés

| Elément d'alliage | Symbole chimique | Symbole métallurgique. | Elément d'alliage | Symbole chimique | Symbole métallurgique. |
|-------------------|------------------|------------------------|-------------------|------------------|------------------------|
| Aluminium         | Al               | A                      | Magnésium         | Mg               | G                      |
| Antimoine         | Sb               | R                      | Manganèse         | Mn               | M                      |
| Argent            | Ag               | Ag                     | Molybdène         | Mo               | D                      |
| Azote             | N                | N                      | Nickel            | Ni               | N                      |
| Béryllium         | Be               | Be                     | Niobium           | Nb               | Nb                     |
| Bismuth           | Bi               | Bi                     | Phosphore         | P                | P                      |
| Bore              | B                | B                      | Plomb             | Pb               | Pb                     |
| Cadmium           | Cd               | Cd                     | Silicium          | Si               | S                      |
| Cérium            | Ce               | Ce                     | Soufre            | S                | F                      |
| Chrome            | Cr               | C                      | Strontium         | Sr               | Sr                     |
| Cobalt            | Co               | K                      | Titane            | Ti               | T                      |
| Cuivre            | Cu               | U                      | Tungstène         | W                | W                      |
| Etain             | Sn               | E                      | Vanadium          | V                | V                      |
| Fer               | Fe               | Fe                     | Zinc              | Zn               | Z                      |
| Gallium           | Ga               | Ga                     | Zirconium         | Zr               | Zr                     |
| Lithium           | Li               | Li                     |                   |                  |                        |

### 5.4.1 Désignations des aciers fortement alliés

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

- d'un nombre indiquant la teneur moyenne en carbone au centième pour cent.
- des symboles normalisés des éléments d'addition rangés dans l'ordre de teneur décroissante.
- des chiffres indiquant la teneur moyenne en pour cent des éléments d'addition. Dans le cas des aciers fortement alliés, les chiffres indiquent directement la teneur en % des éléments d'addition, donc il n'est pas nécessaire de diviser par les coefficients 4 ou 10 comme dans le cas des aciers faiblement alliés.

#### Exemple :

#### **Z 160 CDV 12**

Z : symbole de l'acier fortement allié contenant :

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

#### **Z 6 CN 18 – 09**

C'est l'acier inoxydable courant contenant :

- 0,06 % de carbone



-18 % de chrome.

- 9 % de nickel.

## 5.1 Les Fontes

On appelle fonte, un alliage fer-carbone dont la teneur en carbone varie de 1,7 à 6,67 % C. Pratiquement la teneur en carbone dans la fonte varie de 3 à 4 % C, 92 % de fer ainsi que d'autres éléments tels que le silicium, le manganèse, le soufre et le phosphore. Elles ont une bonne aptitude au moulage. Ces alliages sont obtenus par solidification, et ont des caractéristiques qui dépendent des différentes phases qui les constituent (phases semblables à celles des aciers dans lesquelles vient s'insérer le graphite). L'apparition de ces phases s'explique à partir des phénomènes physiques liés à la solidification : la germination et la croissance. Le synoptique de la figure 30 décrit les diverses possibilités de structures des fontes et les modes d'élaboration.

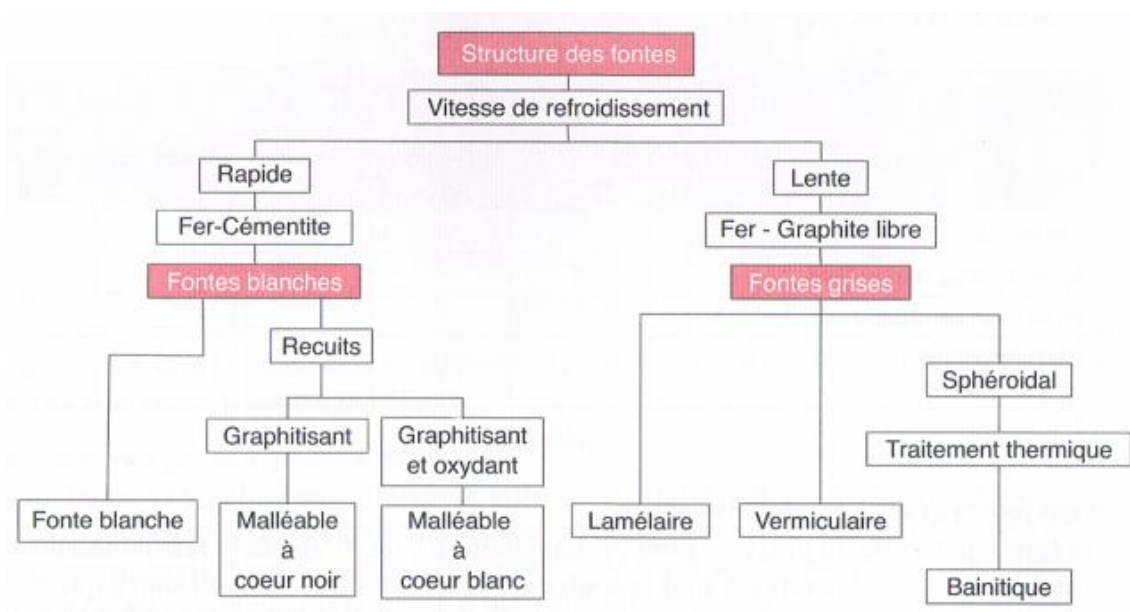


Fig. 31 Synoptique décrivant les diverses possibilités de structures des fontes [5]

On distingue deux types de fonte : les fontes blanches et les fontes grises

**5.1.2 Les fontes blanches :** sont ainsi appelées en raison de leur cassure blanchâtre mais aussi en raison de l'absence totale de graphite libre. L'obtention des fontes blanches est favorisée par un refroidissement lent, par la présence de manganèse(Mn) qui est un élément carburigène qui provoque la formation de la cémentite et empêche la précipitation du carbone sous forme de graphite libre. Les constituants de la fonte blanche sont ceux d'un acier hypereutectoïde, soit *cémentite* et *perlite*.

Ces fontes sont dures (HB = 350 à 500) ce qui leur donne une bonne résistance à l'abrasion. Ces fontes sont utilisées pour la fabrication de pièces devant résister à l'abrasion et ne nécessitant pas d'usinage tel que des mâchoires de concassage, buse de sablage etc...

**5.1.3 Les fontes grises :** La fonte grise contient la majorité de son carbone sous forme de graphite. C'est ce dernier qui donne à la fonte une couleur grisâtre à sa cassure. Elles sont constituées d'une matrice ferritique, perlitique ou mixte. Elles contiennent un pourcentage élevé en silicium (1 à 2,8%) qui est un élément graphitisant et du phosphore (< 1,5%) afin de diminuer le point de fusion.

**Carbone équivalent (Céq) :** paramètre qui tient compte de l'effet graphitisant du silicium et du phosphore :

$$\text{Céq} = \% \text{C} + 1/3 (\% \text{Si} + \% \text{P}).$$

Cas de la fonte hypoeutectique : Céq < 4,3 % ;

Cas de la fonte eutectique : Céq = 4,3 % ;

Cas de la fonte hypereutectique : Céq > 4,3 %.

Les constituants des fontes grises sont au nombre de trois :

- Graphite
- Perlite
- Cémentite ou ferrite

Le troisième constituant n'existe pas dans la fonte rigoureusement perlitique. On peut prévoir que la fonte perlitique est celle qui résiste le mieux aux efforts mécaniques.

### 5.1.4 Les fontes à graphite lamellaire

L'obtention de ce type de fonte s'effectue avec un refroidissement lent afin de garantir la forme naturelle du graphite libre sous forme lamellaire. Ces lamelles de graphite sont la source de concentrations de contraintes qui rendent ces fontes fragiles en traction. Ces fontes ont une capacité d'amortissement des vibrations remarquable et une résistance élevée à la compression. Excellente usinabilité, forte résistance à l'usure par frottement à sec, Bonne résistance à la corrosion en milieux salins, acides et basiques.

Exemples d'application en mécanique : tambours, pistons, disques de freins, turbines, variateurs, couronnes dentées, engrenages...

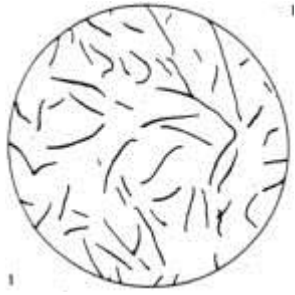
### 5.1.5 Les fontes à graphite sphéroïdal

La fonte grise à graphite sphéroïdal non alliée, à matrice ferrito-perlitique, est appelée fonte ductile ou nodulaire. Le graphite présent dans ces fontes se trouve sous une forme sphéroïdale, ce qui confère à ces fontes une bonne ductilité. Le magnésium est l'élément le plus utilisé pour l'obtention de fonte à graphite sphéroïdal.

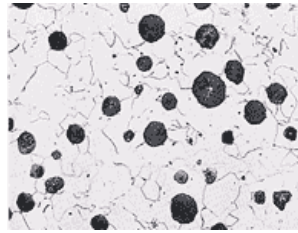
Caractéristiques mécaniques élevées, déformation avant rupture beaucoup plus élevée que les fontes grises, module d'élasticité voisin de celui des aciers. Très bonne résistance à la fatigue et bonne tenue aux températures élevées (jusqu'à 600°). Cette fonte est adaptée aux pièces soumises à des pressions importantes et résiste bien aux vibrations.

Exemples d'applications : machines-outils, Arbres à cames, bielles, disques de freins, pignons, vilebrequins...

Résistance à la corrosion équivalente à celle des fontes grises.



a) Fonte à graphite lamellaire



b) Fonte à graphite sphéroïdal

**Fig.32** Micrographie d'une fonte à graphite lamellaire a) et à graphite sphéroïdal b)

## Exercice n°1

### La maille de NaCl

Lors de la cristallisation de NaCl, il ya formation d'une structure cubique. En prenant la masse moléculaire de NaCl égale à 58,46 et la densité égale à  $2,167\text{g/cm}^3$ , calculer la distance interatomique (distance entre deux atomes voisins).

#### Solution :

Masse des molécules de NaCl

$$58,46\text{g/mole} : 6,02 \times 10^{23} = 9,7 \times 10^{-23} \text{ g}$$

Calculons le nombre de molécules de NaCl par unité de volume

$$2,167\text{g/cm}^3 : 9,7 \cdot 10^{-23} \text{ g} = 2,23 \cdot 10^{22} \text{ molécules/cm}^3$$

Comme NaCl est une liaison diatomique, alors nous pouvons trouver le nombre d'atomes par unité de volume :

$$2\text{atomes/molécule} \times 2,23 \cdot 10^{22} \text{ molécules/cm}^3 = 4,5 \cdot 10^{22} \text{ atomes/cm}^3$$

Soit **a** la distance entre deux atomes voisins mesurée le long de l'arête du cube et **n** le nombre d'atomes le long d'une arête du cube de longueur 1 cm. Alors la longueur de l'arête sera égale à  $na$  et le volume du cube à  $n^3a^3$ . Comme  $n^3$  est le nombre d'atomes dans  $1 \text{ cm}^3$ , nous obtenons :

$$4,5 \cdot 10^{22} \text{ atomes/cm}^3 \times a^3 = 1$$

$$\text{C'est-à-dire : } a^3 = 2,24 \cdot 10^{-24} \text{ cm}^3 \quad \text{ou bien} \quad a = 2,82 \cdot 10^{-8} \text{ cm} = \mathbf{2,82 \text{ \AA}}$$

## Exercice n° 2

Le **chlorure de potassium** est un composé chimique minéral de formule KCl. Sous sa forme solide, ce sel neutre équivaut au minéral tendre nommé **sylvine**, ou sel amer, ou encore sylvite en anglais, de structure cristallographique cubique à faces centrées de densité  $1,98 \text{ g/cm}^3$ .

Calculer :

- La distance entre deux atomes voisins (**Réponse** :  $3,14 \text{ \AA}$ )
- La distance minimale entre deux atomes de même sorte (**Réponse** :  $6,28 \text{ \AA}$ )

## Exercice n°3

Dans le composé défini  $\text{Mg}_2\text{Si}$ , les atomes de silicium sont en position c.f.c ( longueur de l'arête =  $0,639 \text{ nm}$ ). Les atomes de magnésium sont en position cubique simple.

- Calculer la masse volumique de ce corps.

## Métallurgie : Cours et exercices corrigés

---

2. Calculer la distance entre deux atomes de magnésium et entre un atome de magnésium et un atome de silicium voisins.
3. Le rayon de covalence du magnésium est de 0,16 nm et celui de l'ion magnésium est 0,065 nm.  
En déduire la structure de  $Mg_2Si$ , et calculer sa compacité.

### Exercice n°4

La maille du sulfure de zinc est telle que le zinc occupe les positions d'un système c.f.c (arête 2 a), et que chaque atome de soufre est au centre du volume V constitué par les atomes de zinc qui l'entourent.

1. Indiquer la nature géométrique (nom et valeur du coté) de V.
2. Indiquer la nature géométrique du solide constitué par les atomes de soufre entourant un atome de zinc.
3. Les atomes de soufre intérieurs à la maille de zinc sont situés aux sommets d'un solide que l'on définira.
4. Quelle est la nature du réseau du soufre ?

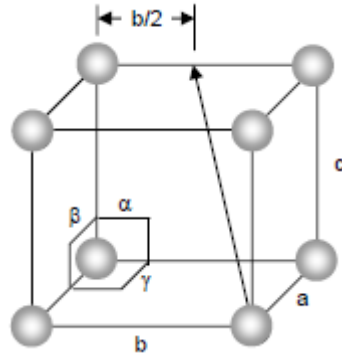
### Exercice n°5

On considère un carbure de tungstène qui cristallise dans un système hexagonal ; les atomes de tungstène sont les bases du prisme, tandis que ceux de carbone sont dans la section droite moyenne.

1. Déterminer la formule de ce carbure, et calculer sa masse volumique(  $a = 0,2906$  nm et  $c = 0,2837$  nm).
2. Calculer les rayons atomiques du tungstène et du carbone ( en supposant que certains atomes sont en contact) et la compacité.
3. Le tungstène cristallise dans le système cubique centré, le coté de la maille étant de 0,3156 nm.  
En déduire le rayon ionique du tungstène.

### Exercice n°6

Considérez la maille élémentaire du polonium (Po) représentée ci-contre. Bien entendu, dans le cristal réel, les atomes de polonium se touchent. Le motif associé à cette maille est constitué d'un atome sphérique de rayon  $R$  et les paramètres de la maille sont tels que :



$$\mathbf{a} = \mathbf{b} = \mathbf{c} = 0,3354 \text{ nm} \quad ; \quad \alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$$

- Déterminez le système cristallin, le réseau de Bravais ainsi que la compacité de cette maille.
- Donnez le nom du site situé au centre de la maille. Combien la maille possède-t-elle de tels sites en propre ?
- Exprimez, en fonction du rayon  $\mathbf{R}$  des atomes de polonium, le rayon  $\mathbf{r}$  de ce site.
- Dans le cas où ce site est occupé par un autre atome, quel est alors le réseau de Bravais ? Justifiez votre réponse.
- Indexez la direction dessinée sur la figure ci-dessus.
- Dans la maille donnée sur le formulaire de réponse, dessinez les plans (111) et (011).
- Calculez la densité surfacique d'atomes de polonium (en  $\text{at}/\text{nm}^2$ ) dans le plan (111).
- Quelle est la masse volumique théorique (en  $\text{g}/\text{cm}^3$ ) du polonium ?

**Données :** Masse atomique  $\mathbf{Po} = 209 \text{ g/mol}$

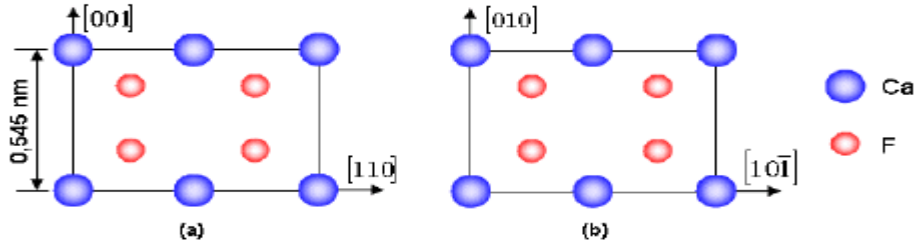
$$\text{Nombre d'Avogadro: } \mathbf{N_A} = 6,022 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$$

## Exercice n°7

Le fluorure de calcium cristallise selon le système cubique et la figure ci-contre montre la disposition des ions  $\mathbf{Ca}$  et  $\mathbf{F}$  dans deux plans particuliers de cette maille cubique.

- Quels sont les indices de Miller des plans **(a)** et **(b)** ?
- Quels sont les indices de la direction réticulaire définie par l'intersection des plans **(a)** et **(b)** ?
- Quel est le réseau de Bravais du fluorure de calcium ?
- Quel type de site occupent les ions  $\mathbf{F}$  dans le réseau de Bravais défini par les ions  $\mathbf{Ca}$  ? Quelle est la proportion de ces sites occupés dans une maille élémentaire ?
- Combien d'ions  $\mathbf{Ca}$  et d'ions  $\mathbf{F}$  appartiennent au motif associé à ce cristal ? Donnez les coordonnées relatives des ions du motif dans la maille.
- Quelle est la masse volumique théorique (en  $\text{g}/\text{cm}^3$ ) du fluorure de calcium ?

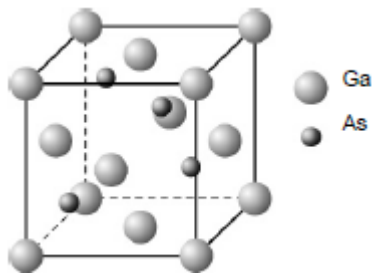
**Données :** Masse atomique (g/mole) : **Ca = 40,08**      **F = 19,00**  
 Nombre d'Avogadro:  $N_A = 6,022 \times 10^{23} \text{ mole}^{-1}$



## Exercice n°8

L'arséniure de gallium GaAs est un semi-conducteur très prometteur. Sa structure cristalline est représentée ci-contre. Son paramètre de maille **a** est égal à 0,565 nm.

- Quel est le réseau de Bravais du GaAs ?
- Quel type de sites occupent les atomes d'arsenic (As) dans la maille élémentaire et en quelle proportion ?
- Sur la figure donnée au formulaire de réponse, dessinez le plan (110) et calculez la densité atomique superficielle d'atomes dans ce plan.
- Calculez la masse volumique théorique  $\rho$  du GaAs (en  $\text{g/cm}^3$ )

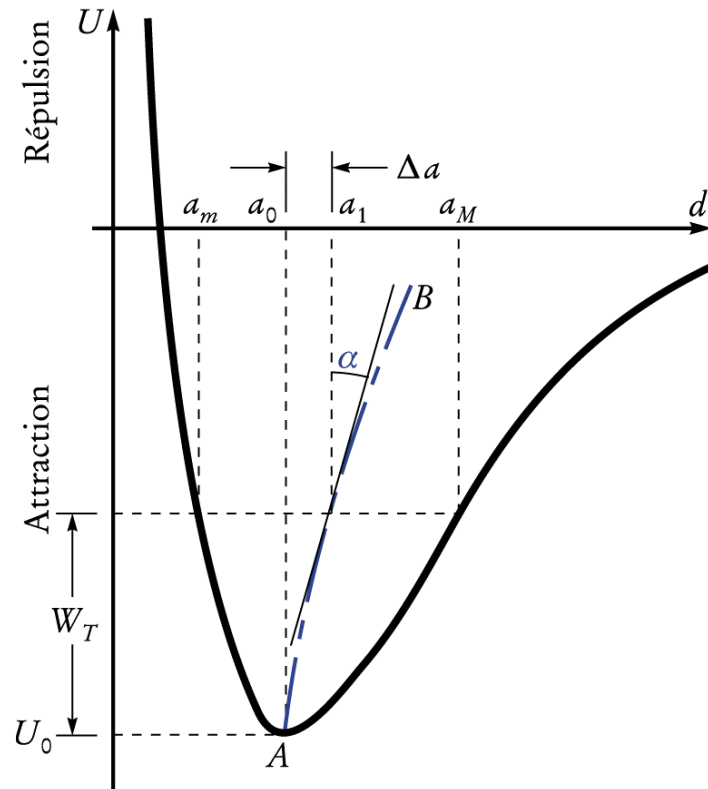


**Données :** Masse atomique (g/mole): **Ga = 69,72**      **As = 74,92**  
 Nombre d'Avogadro :  $N_A = 6,022 \times 10^{23} \text{ mole}^{-1}$

## Exercice n°9

La courbe ci-contre schématise la variation de l'énergie interne **U** d'un ensemble d'atomes (au zéro degré absolu) en fonction de la distance **d** entre ces atomes. Cette courbe est caractérisée par certains paramètres **A**, **B**, **C**, **D** et **F**.

Dans la liste des propriétés d'un matériau qui est donnée sur le formulaire de réponse, associez l'un des paramètres **A**, **B**, **C**, **D** ou **F** à la propriété qui y est directement reliée.



### Exercice n°10

Selon la température, l'étain peut se présenter à l'état solide sous deux formes allotropiques : L'étain gris ( $\alpha$ ) et l'étain blanc ( $\beta$ ). À la température ambiante, la forme d'équilibre est la forme  $\beta$ , dont la maille cristalline est représentée ci-contre. La masse atomique de l'étain (Sn) est égale à 118,7 g/mole. Nombre d'Avogadro  $N_A = 6,022 \times 10^{23}$

- Quel est le système cristallin de l'étain blanc ( $\beta$ ) ?
- Quel est le réseau de Bravais de l'étain blanc ( $\beta$ ) ?
- Quelle est la masse volumique théorique  $\rho$  (en g/cm<sup>3</sup>) de l'étain blanc ( $\beta$ ) ?
- Calculez la densité linéique d'atomes (en at/nm) selon la direction  $[1\ 1\ 1]$ .
- Calculez la densité surfacique d'atomes (en at/nm<sup>2</sup>) dans les plans (101) et (1 10) .
- Combien de plans particuliers contiennent la famille  $\{101\}$  et la famille  $\{110\}$  ?

### Exercice n°11

Ci-contre, voici la disposition des atomes d'or (Au) et de cuivre (Cu) dans la maille élémentaire d'un composé de ces deux métaux. Afin d'assurer plus de lisibilité, les atomes représentés sur la figure ne sont pas tangents, mais en réalité, les atomes de Au et de Cu se touchent selon les directions (011).



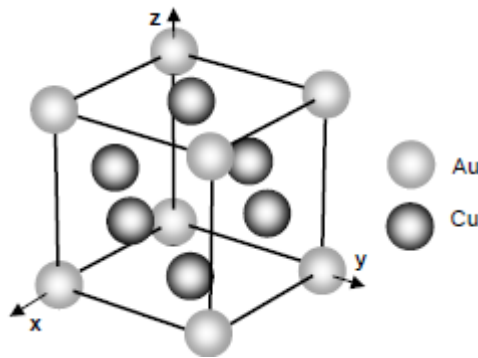
## Métallurgie : Cours et exercices corrigés

---

### Données :

Rayon atomique  $r$  :  $r_{\text{Cu}} = 0,128 \text{ nm}$  ;  $r_{\text{Au}} = 0,144 \text{ nm}$   
Masse molaire  $A$  :  $A_{\text{Cu}} = 63,54 \text{ g/mole}$   $A_{\text{Au}} = 197,0 \text{ g/mole}$   
Nombre d'Avogadro :  $N_A = 6,02 \times 10^{23} \text{ at/mole}$

- Quel est le réseau de Bravais qui décrit ce composé ?
- Quel est le motif associé à ce réseau ? *Sur la figure donnée au formulaire de réponse, encerclez par un seul trait l'ensemble des atomes constitutifs de ce motif.*
- Sur la figure donnée au formulaire de réponse, tracez le plan (1 10) .
- Quelle est la densité surfacique (en  $\text{at}/\text{nm}^2$ ) d'atomes de cuivre et celle d'atomes d'or dans ce plan (1 10) ?
- Quelle est la densité linéique (en  $\text{at}/\text{nm}$ ) d'atomes de cuivre et celle d'atomes d'or le long de la direction  $\{112\}$  ?
- Quelle est la compacité (exprimée en %) de ce cristal ?
- Quelle est la masse volumique théorique (en  $\text{g}/\text{cm}^3$ ) de ce cristal ?



## Exercice n° 12

A l'annexe 1, vous disposez du diagramme d'équilibre étain – or (Sn – Au). Vous disposez aussi des données suivantes :

Masse atomique :  $A_{\text{Sn}} = 118,65$  g/mole

$A_{\text{Au}} = 196,97$  g/mole

a) Combien y a-t-il de réactions eutectiques sur ce diagramme ? Identifiez une réaction eutectique en donnant la température de cette réaction ainsi que les phases en présence et leurs compositions exprimées en %m Au.

b) Sur ce diagramme, la verticale notée  $\beta$  représente-t-elle :

- Un composant ?
- Une réaction eutectoïde ?
- Une réaction eutectique ?
- Un composé défini stoechiométrique ?
- Un composé défini non stoechiométrique ?

c) Quelle est la formule chimique de la phase  $\gamma$  ?

d) A  $216,9^\circ\text{C}$ , quels sont les constituants présents dans un alliage Sn + 20% m Au, refroidi à l'équilibre à partir de  $300^\circ\text{C}$  ? Donnez la composition et la proportion massique de ces constituants.

e) Quelle est la solubilité maximale de l'étain dans l'or (exprimée en %m Sn) ?

f) Les alliages riches en or (%m Au > 90 %) peuvent-ils théoriquement se prêter à un traitement de durcissement structural ? Justifiez votre réponse et, si oui, indiquez pour quelle composition on obtiendrait un durcissement structural maximal.

## Exercice n° 13

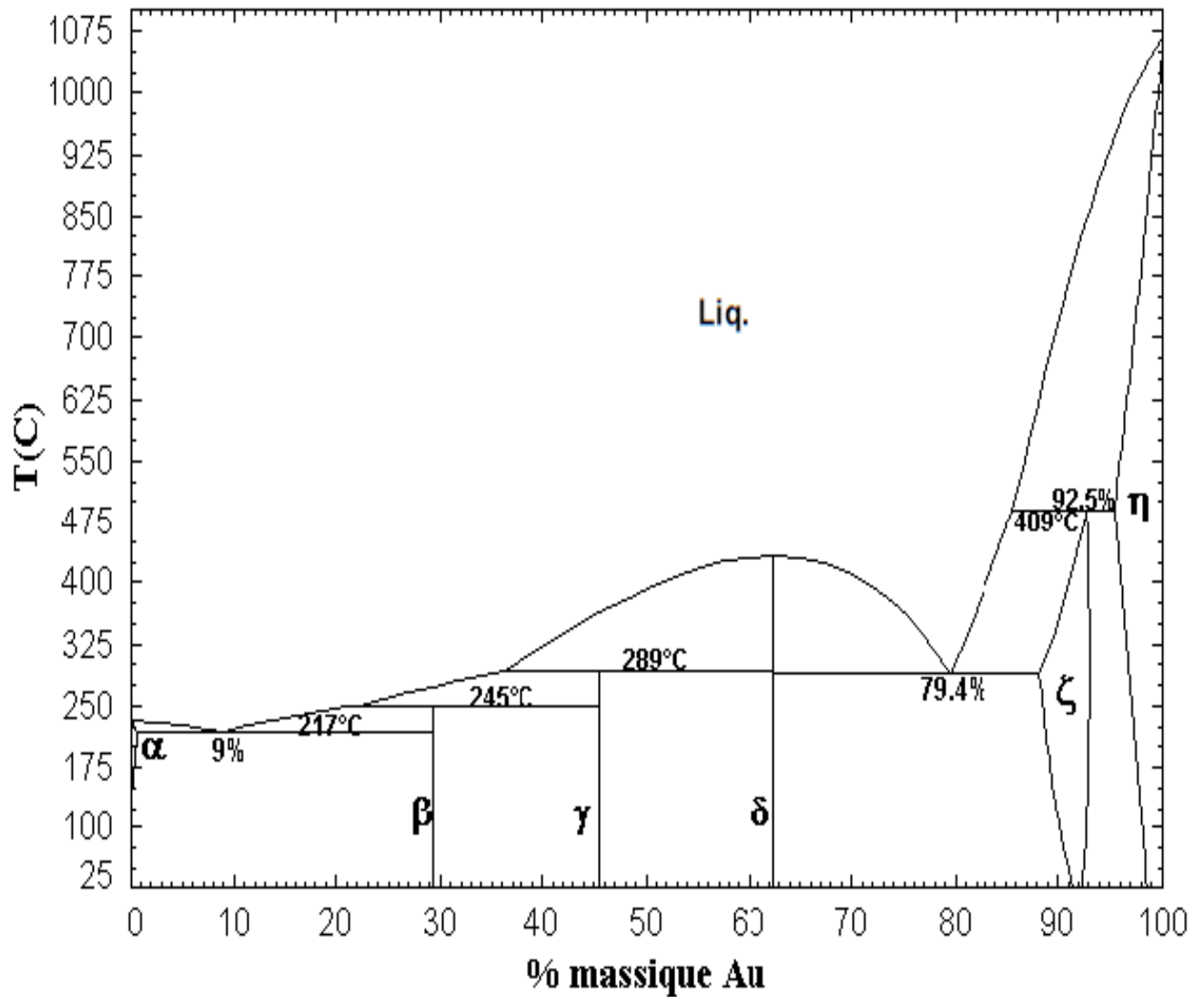
### Diagramme d'équilibre Mg – Pb

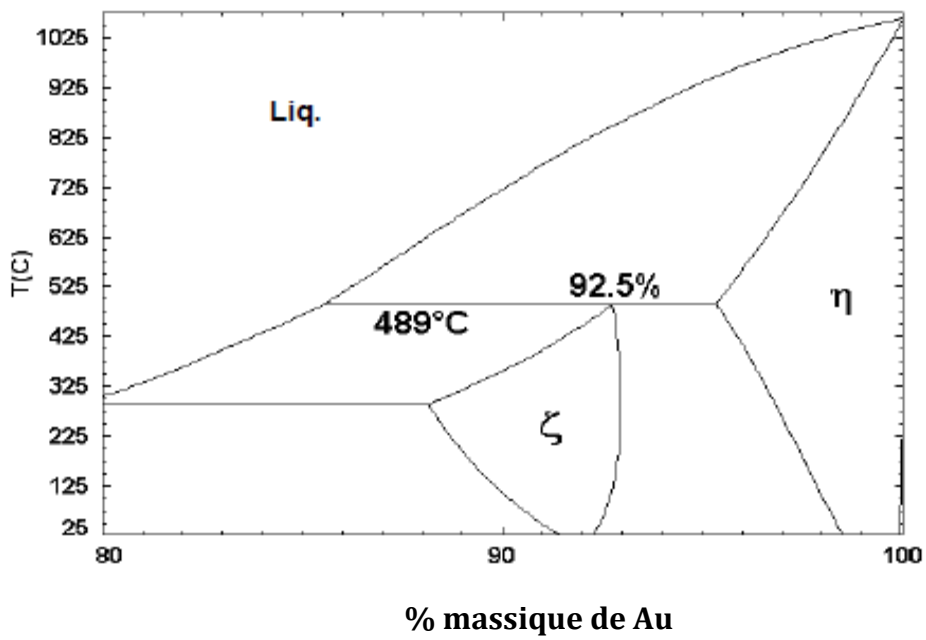
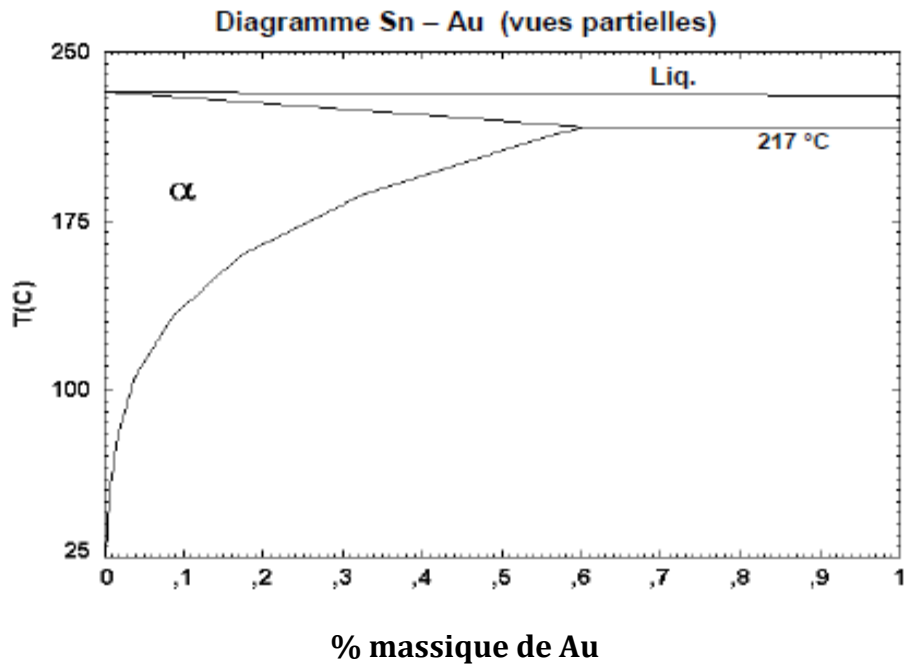
Considérez le diagramme d'équilibre Mg – Pb donné en annexe.

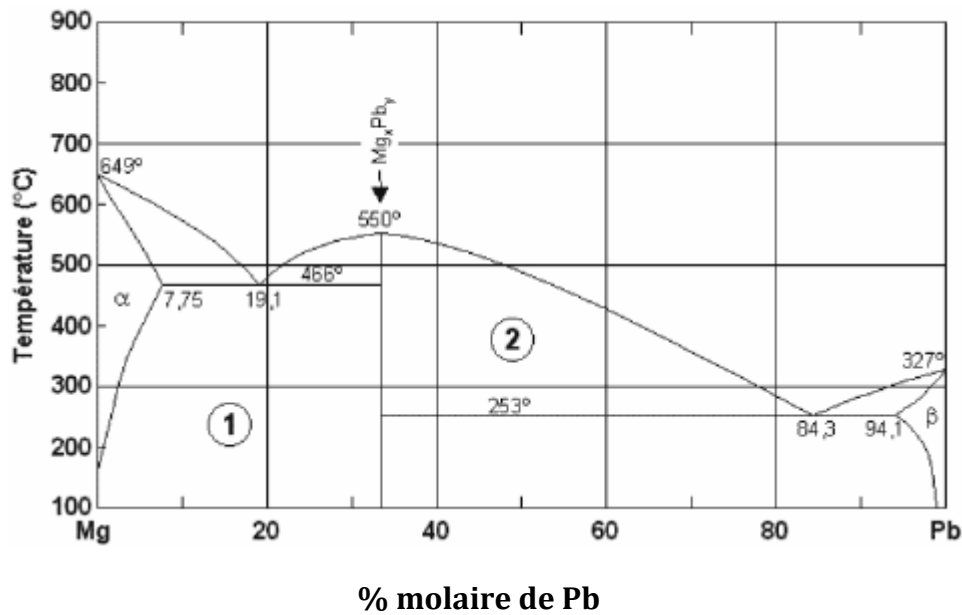
- Quelle est la formule chimique du composé  $\text{Mg}_x\text{Pb}_y$  ? Est-ce un composé stoechiométrique ? Justifiez votre réponse.
- Quelles sont les phases en présence dans les domaines numérotés **1** et **2** sur le diagramme ?
- A quelle température la solubilité du Pb dans le Mg est-elle maximale ?
- Combien y a-t-il de réactions eutectiques dans ce diagramme ? Écrivez ces réactions indiquez leur température et les compositions des phases en présence.
- Quels sont les phases et les constituants présents à  $465^\circ\text{C}$  dans un alliage contenant 10% molaire de Pb ? Pour chacun(e) d'entre eux (elles), donnez leur composition (en % mol. de Pb) et leur proportion (en % mol.).

## Métallurgie : Cours et exercices corrigés

- f) Que se passe-t-il si l'on refroidit, à l'équilibre, l'alliage (contenant 10% molaire de Pb) de 465°C à 20°C ?







**Diagramme Mg-Pb**

## Exercice n° 14

Selon la température  $\theta$  à laquelle il se trouve à l'état solide, le fer peut se présenter sous deux formes cristallines (phases allotropiques):

- Pour  $\theta < 910$  °C, la structure cristalline du fer est cubique centrée (CC), appelée phase  $\alpha$  (ou ferrite).
- Pour  $910$  °C  $< \theta < 1394$  °C, la structure cristalline du fer est cubique à faces centrées (CFC), appelée phase  $\gamma$  (ou austénite).

Lorsque l'on chauffe du fer, il subit donc, à  $910$  °C, un changement de sa structure cristalline, appelé changement de phase allotropique. Bien entendu, au cours de cette transformation allotropique, la taille des atomes de fer ne change pas et le rayon  $r$  des atomes est égal à  $0,129$  nm.

- Quelle est la valeur (en nm) du paramètre  $a$  de la maille cristalline élémentaire de la phase  $\alpha$  (à  $909$  °C) et celui de la phase  $\gamma$  (à  $911$  °C) ?
- Calculez la compacité (en %) de la phase  $\alpha$  et celle de la phase  $\gamma$ .
- Au cours d'un chauffage, lors du passage de la phase  $\alpha$  à la phase  $\gamma$  à  $910$  °C, y a-t-il variation de la masse volumique du fer ? Si oui, dans quel sens (augmentation ou diminution) ?
- Sur les figures données au formulaire de réponse, tracez un système particulier de glissement cristallographique dans la phase  $\alpha$  et dans la phase  $\gamma$ .

### Exercice n° 15

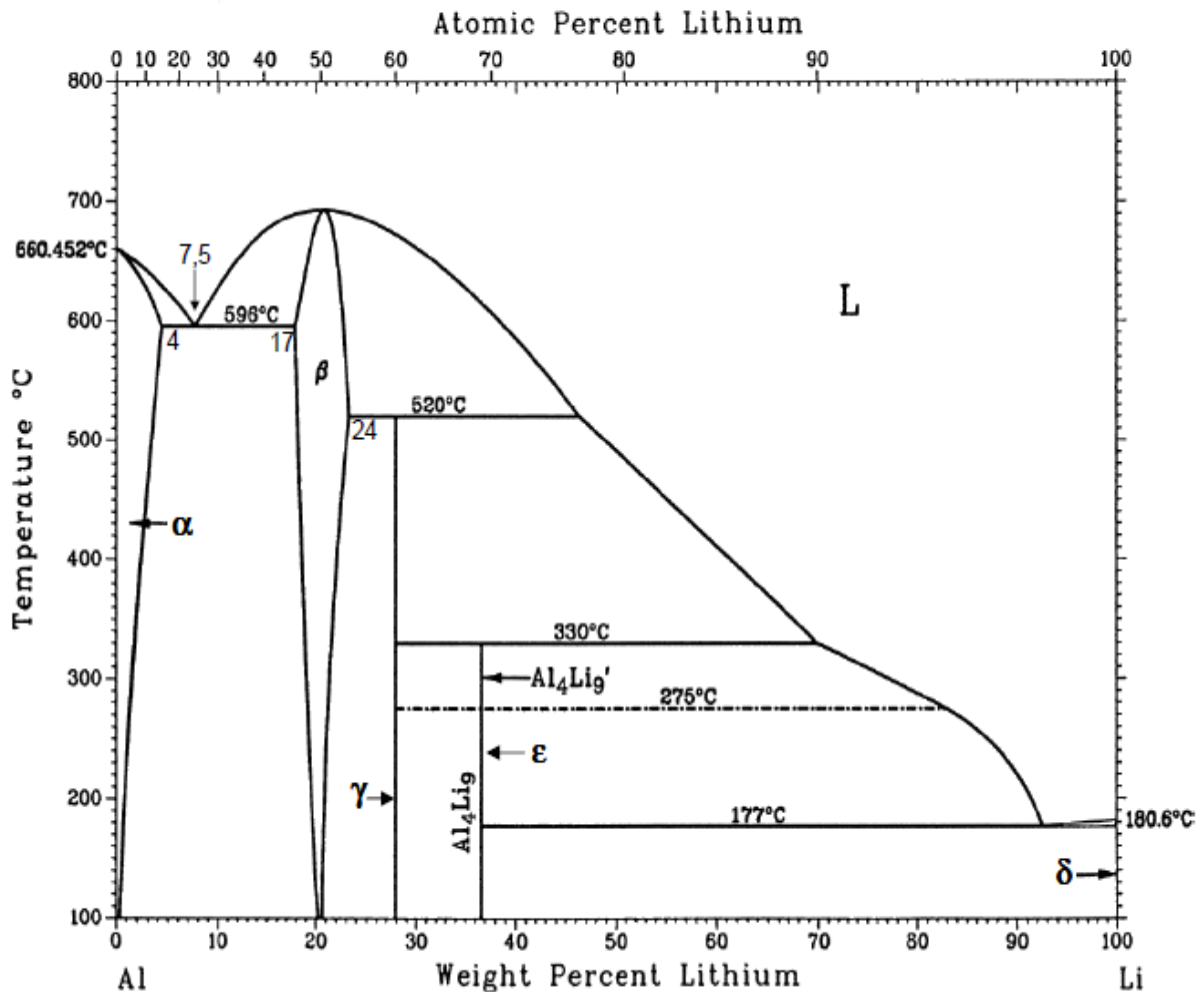
Grâce à sa très faible masse volumique (0,53 g/cm<sup>3</sup>), le lithium est utilisé, en faible concentration (%m. < 10%), comme élément d'alliage dans l'aluminium pour produire des alliages destinés principalement à l'aéronautique.

En annexe, vous disposez du diagramme d'équilibre aluminium – lithium (**Al – Li**).

- a) Combien y a-t-il de points eutectiques sur le diagramme Al – Li et quelle est la température qui caractérise chacun de ces points ?
- b) Quels sont les composés définis présents sur le diagramme Al - Li ? Lesquels sont stœchiométriques et lesquels ne le sont pas ?
- c) Quelle est la formule chimique de la phase  $\gamma$  ?
- d) Quelle doit être la composition nominale  $C_0$  (en %m) en Li d'un alliage qui, à 400 °C, contient 50 %m. de phase  $\gamma$  et 50 %m de liquide ?  
Les alliages commerciaux Al – Li sont des alliages qui se prêtent au traitement de durcissement structural.
- e) Quelle est la teneur théorique maximale en lithium (en %m. Li) de ces alliages ?
- f) À quelle température optimale (en °C) doit être fait la mise en solution solide du lithium, étape qui précède la trempe et le vieillissement ?

ANNEXES

Diagramme d'équilibre Al – Li



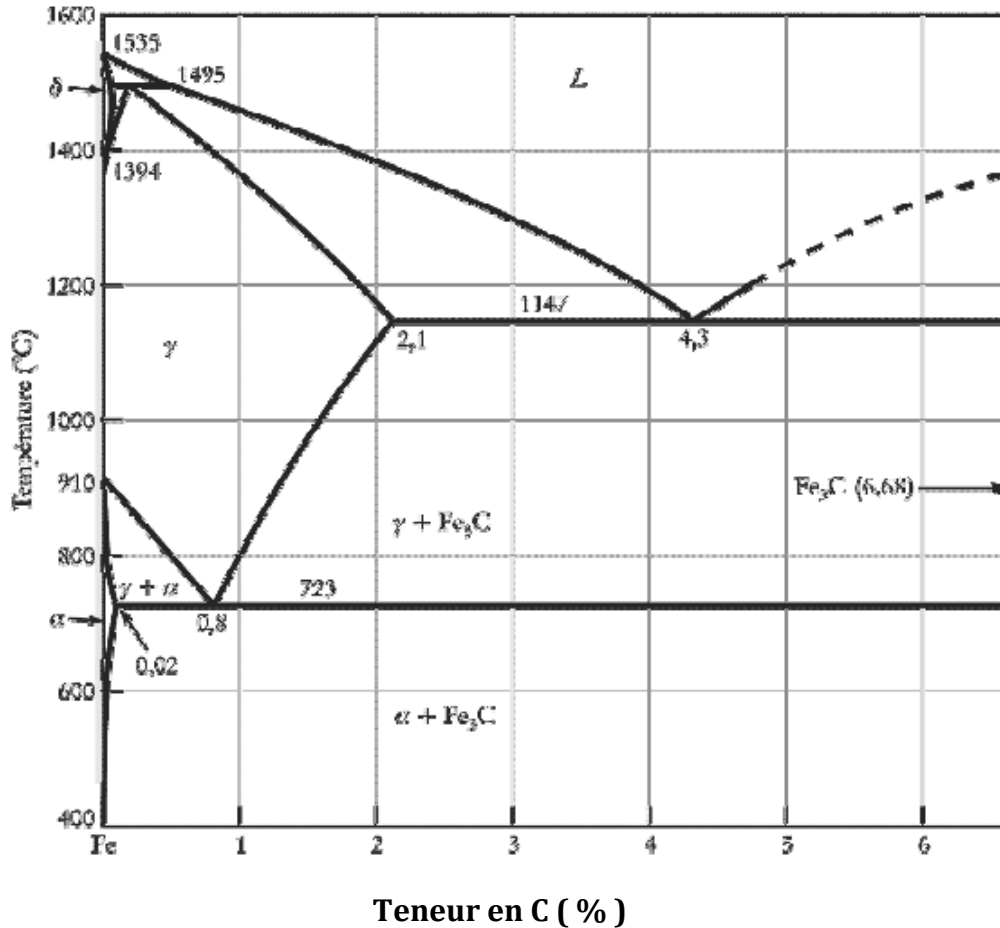
Exercice n° 16

Les fontes, composées essentiellement de fer contenant de 2,5 à 5 %m. de carbone, sont des alliages ferreux fréquemment utilisés, car elles sont bon marché. En annexe, vous disposez du diagramme Fe-C (jusqu'à 6,68m %C) et vous étudiez le refroidissement à l'équilibre d'une fonte à 3,0 %m C qui a été portée à l'état liquide:

- Sur le formulaire de réponse, dites quel est le type de cette fonte.
- Quelles sont les températures de début ( $\theta_d$ ) et de fin ( $\theta_f$ ) de solidification de cette fonte (en °C) ?
- À 1000 °C, quelles sont les phases en présence, leur composition respective (en %m C) et leurs proportions (en %m) ?
- À 722 °C, quels sont les constituants de cette fonte, leur composition respective (en %m C) et leurs proportions (en %m) ?
- Que se passe-t-il dans cette fonte lorsqu'elle est refroidie à l'équilibre de 722 °C jusqu'à 20 °C ?

## ANNEXES

Diagramme d'équilibre Fe - C ( 6,68 % )



### Exercice n° 17

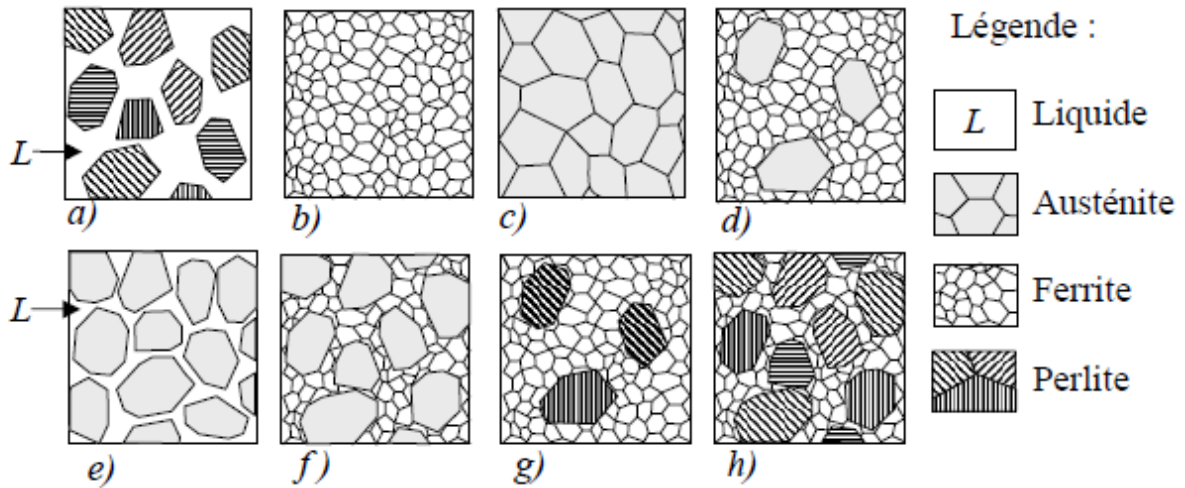
Considérez le diagramme d'équilibre « fer – carbone » (Fe – C) donné en annexe. La cémentite **Fe<sub>3</sub>C** a une composition massique en carbone égale à 6,68% m.

a) A quelle(s) température(s) le fer pur solide subit-il une transformation allotropique au chauffage ? Précisez le changement de phase qui se produit au cours de la transformation allotropique.

Un alliage « fer – carbone » contenant 0,6%C est refroidi à l'équilibre depuis l'état liquide jusqu'à la température ambiante (20°C).

b) Lequel des schémas présentés ci-dessous représente la microstructure de cet alliage aux températures suivantes : 1460°C, 1400°C, 724°C et 20°C ?



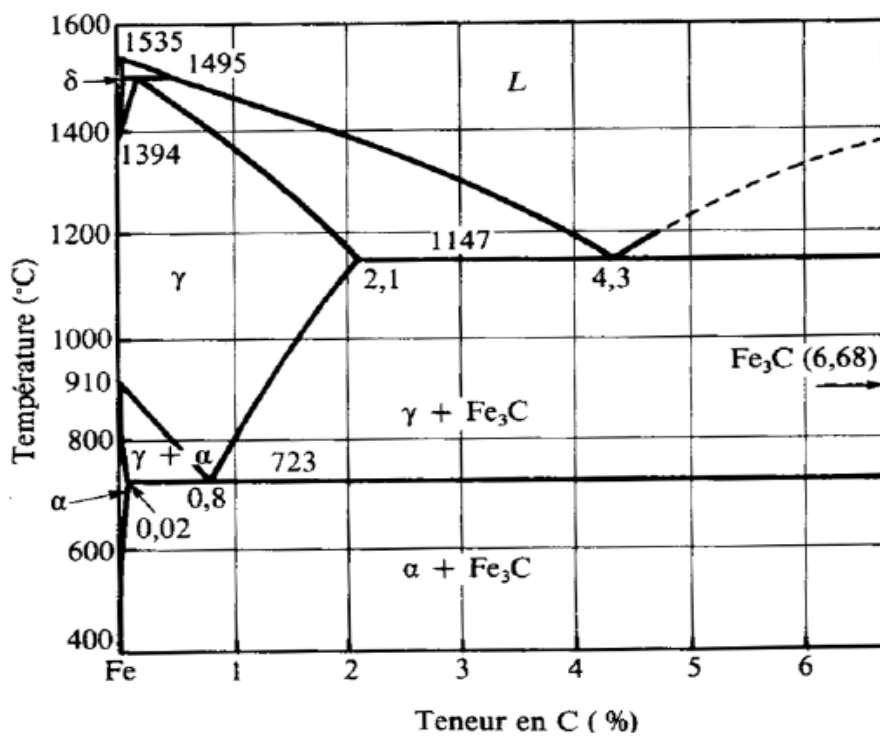


Considérez maintenant un acier de composition eutectoïde.

- c) Quelles sont les phases en présence et leur proportion à la température ambiante (20 °C) ?
- d) Quelles sont les températures de début et de fin de solidification de cet acier ?
- e) Lequel des schémas (proposés ci-dessus) représente la microstructure de cet acier à 1420 °C ?

## ANNEXES

Diagramme fer – carbone



### Exercice n° 18

Vous disposez d'un acier (alliage « fer – carbone ») dont vous ignorez la teneur en carbone. Cependant, après avoir chauffé cet acier à 850 °C et l'avoir laissé refroidir lentement au four jusqu'à la température ambiante (20 °C), vous constatez, sur une métallographie de cet acier, qu'il contient 91,3 % de ferrite  $\alpha$  et 8,7 % de cémentite  $\text{Fe}_3\text{C}$ . Comme vous disposez du diagramme d'équilibre « fer – carbone » (voir en annexe), il vous est alors aisé de répondre aux questions suivantes :

- Quelle est la composition nominale  $C_0$  (%m) en carbone de cet acier ?
- À 724 °C, quelles sont les phases en présence, leur composition (en %m C) et leur fraction massique respective (en %m) ?
- Quelle est la fraction massique de perlite présente dans l'acier à la température ambiante, à la fin du refroidissement lent ?

Connaissant maintenant la composition nominale de l'acier, vous mettez la main sur son diagramme TTT (voir en annexe) et vous êtes en mesure de prévoir les constituants présents dans cet acier qui, après avoir complètement été austénitisé à 850 °C, aura subi les traitements thermiques suivants :

- Trempe à 700 °C et maintien à cette température pendant 100 s, refroidissement quelconque jusqu'à l'ambiante.
  - Trempe à l'eau à 20°C.
  - Trempe à 400 °C, maintien à cette température pendant 20 s et trempe à l'eau à 20°C.
- d) Quels sont les constituants présents dans l'acier et la dureté de l'acier après chacun de ces traitements ?

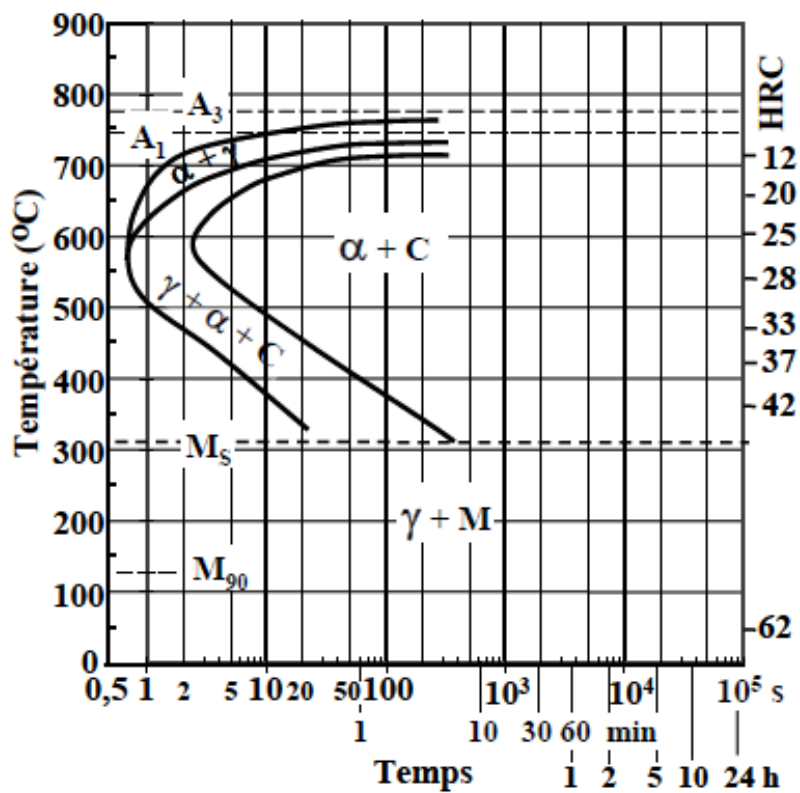
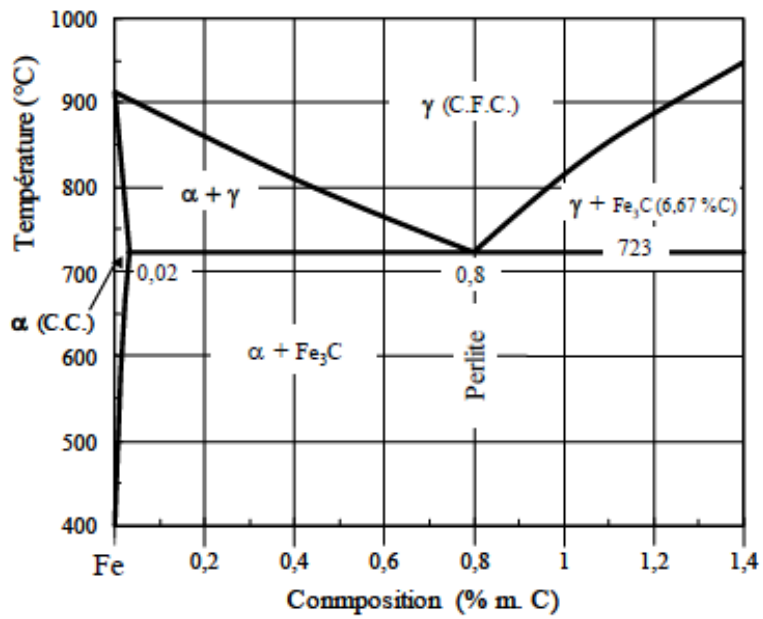


Diagramme Fer-carbone et courbes TTT de l'acier

## Exercice n° 19

### Diagramme aluminium-nickel

1. Tracer le solidus en rouge. Indiquer la teneur en Ni des points eutectiques et péritectiques.
2. Déterminer les formules des combinaisons chimiquement définies et la composition physico-chimique des eutectiques.
3. Indiquer pour chacune des zones numérotées la nature des constituants.
4. Etudier le refroidissement d'un alliage à 35%
5. Discuter la constitution de l'alliage correspondant à l'extrémité droite de l'horizontale à 1380°C

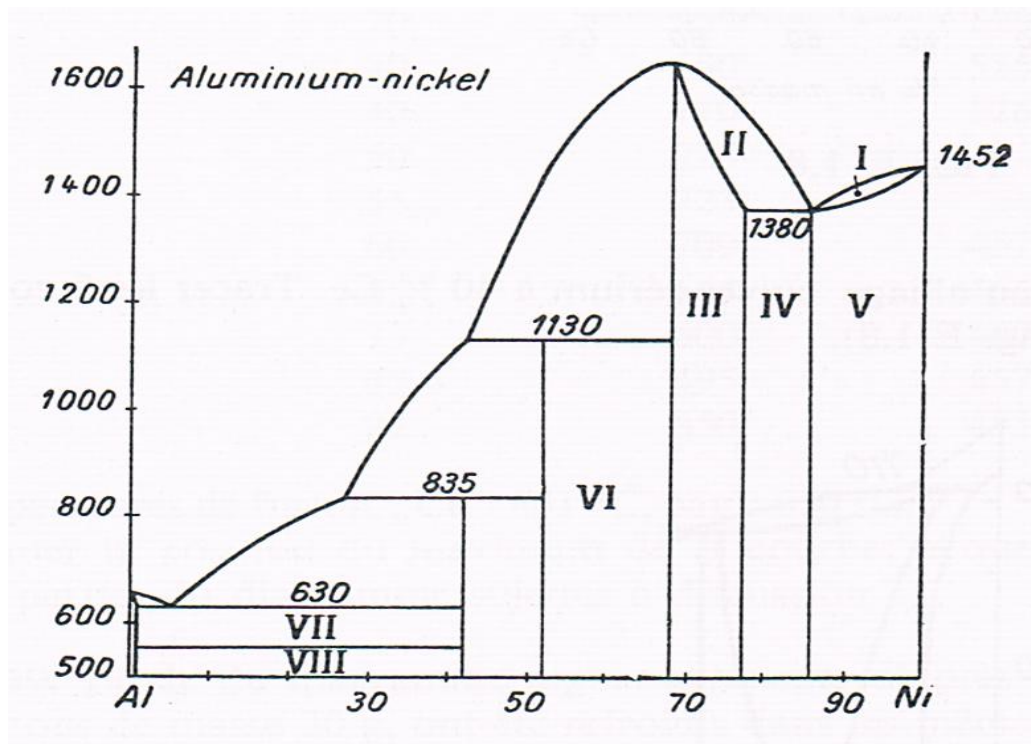


Diagramme Al-Ni [32]

## Exercice n° 20

### Diagramme cuivre-zinc

Considérons le diagramme de phases du système cuivre-zinc. Les lettres grecques identifient (par convention) les domaines monophasés.

- Hachurez les domaines à deux phases. Il faut noter que les domaines monophasés sont toujours séparés par un domaine biphasé sauf en certains points.
- Les deux laitons commerciaux les plus communs sont :  
Le laiton 70/30 :  $m_{Cu} = 70\%$   
Le laiton 60/40 :  $m_{Cu} = 60\%$

Placez leurs points constitutifs sur le diagramme à 200°C

Qu'est-ce qui distingue les deux alliages ?

- Quel est approximativement le point de fusion du laiton 70/30 ?
- Quelles sont les phases dans le laiton 60/40 à 200°C ?
- Quelles sont les phases dans le laiton 60/40 à 800°C ?  
Qu'est-il arrivé à l'autre phase ?

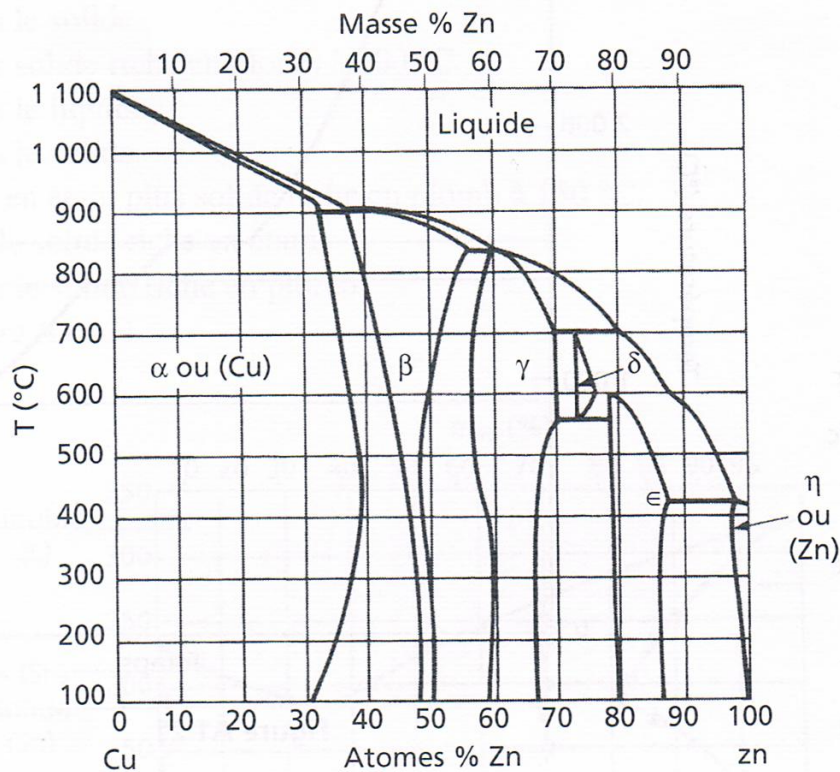
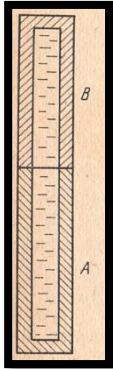


Diagramme cuivre-zinc [15]

## Exercice n° 21

Par la méthode de tube capillaire, déterminer le coefficient de diffusion du calcium dans un laitier liquide dont la composition chimique est la suivante : 40% CaO, 40% SiO<sub>2</sub> et 20% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> à la température de 1873°K.

Données :



Le tube capillaire A contient du laitier liquide avec l'isotope radioactif <sup>45</sup>Ca dont la concentration initiale C<sub>0</sub> = 2,7 mBq

Le tube capillaire B a été mis en contact avec le tube B contenant le même laitier mais sans isotope (voir schéma ci-dessus). Les deux tubes ont été maintenus en contact pendant 6 heures.

|                            |        |        |        |        |
|----------------------------|--------|--------|--------|--------|
| X, m .....                 | 0,0005 | 0,0010 | 0,0015 | 0,0020 |
| Activité de l'isotope, mBq | 1,041  | 0,7556 | 0,5138 | 0,3286 |
| X, m.....                  | 0,0025 | 0,0030 | 0,0035 | 0,0040 |
| Activité de l'isotope, mBq | 0,196  | 0,1073 | 0,0563 | 0,0265 |

## Exercice n° 22

Par la méthode de tube capillaire, déterminer le coefficient de diffusion du soufre dans le fer liquide en fonction de la température.

Données :

Sur la surface du fer liquide (X=0), se trouvant dans le tube capillaire, de longueur 0,1m et de diamètre 0,001m, nous avons placé minutieusement un morceau de fer avec un isotope radioactif <sup>35</sup>S. Le tube capillaire a été maintenu à la température donnée pendant 4 heures. Ensuite l'échantillon a été rapidement refroidi. Le fil métallique obtenu a été découpé en plusieurs morceaux et par la méthode radioactive nous avons déterminé la concentration en

## Métallurgie : Cours et exercices corrigés

soufre [%S] sur une distance X à partir de la surface liquide. Les résultats obtenus sont présentés le tableau ci-dessous :

| Température, °K                     | 1823  | 1873  | 1923  | 1973   |
|-------------------------------------|-------|-------|-------|--------|
| Valeur [%S]<br>sur la distance X, m |       |       |       |        |
| <b>0,02</b>                         | 0,213 | 0,208 | 0,204 | 0,1995 |
| <b>0,04</b>                         | 0,133 | 0,135 | 0,135 | 0,136  |
| <b>0,06</b>                         | 0,062 | 0,065 | 0,068 | 0,071  |
| <b>0,08</b>                         | 0,021 | 0,024 | 0,026 | 0,029  |
| <b>0,10</b>                         | 0,005 | 0,006 | 0,008 | 0,009  |

### Exercice n° 23

On suppose que le coefficient de diffusion du carbone dans l'austénite  $D_0 = 10^{-5} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$  et  $E_d = 134 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$ . On demande de calculer :

1. La valeur du coefficient de diffusion D à 900 °C.
2. La température pour laquelle la diffusion se fait 2 fois plus rapidement.
3. Nous pratiquons une cémentation sur une pièce avec une teneur initiale de 0,15 % de carbone en masse dans une atmosphère à 0,6 % C en masse à la température de 930 °C. Le coefficient de diffusion est alors de  $1,52 \cdot 10^{-11} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ . On veut porter la pièce à une concentration telle qu'on ait 0,35 % C en masse à une profondeur de 0,40 mm.

Déterminer alors :

- a. La valeur de erf ( u ) correspondante à % C = 0,35.
- b. En déduire la valeur de u. On donne erf ( 0,5 ) = 0,5205 et erf ( 0,55 ) = 0,5633
- c. On prendra u = 0,54. Calculer la durée du traitement.

# **CORRIGE DES EXERCICES**



## Exercice N°6

### 2.a) Système cristallin, réseau de Bravais et compacité du polonium.

Système cristallin :  $\mathbf{a} = \mathbf{b} = \mathbf{c}$  et  $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$  donc : Système **CUBIQUE**.

Réseau de Bravais : Atomes uniquement situés aux sommets de la maille. Réseau **CUBIQUE SIMPLE**

Compacité : les atomes se touchent le long des arêtes du cube, leur rayon  $\mathbf{R}$  est égal à  $\mathbf{a}/2$ .

Il y a **1 atome en propre** ( $8 \times 1/8 = 1$ ) appartenant à la maille.

Volume des atomes en propre :

$$V_{\text{at}} = \frac{4\pi R^3}{3} = \frac{4\pi a^3}{3 \times 2^3}$$

Volume de la maille :

$$V_{\text{m}} = a^3$$

Compacité :

$$C = V_{\text{at}} / V_{\text{m}} = \frac{4\pi}{3 \times 2^3} = 0,5236 \approx 52,4 \%$$

### 2.b) Nom du site et nombre de sites en propre dans la maille

Le site est défini par les 8 atomes qui l'entourent. Ces atomes étant aux sommets d'un cube, le site est donc **CUBIQUE**.

Il appartient en totalité à la maille et il n'y en a aucun autre du même type sur les faces ou les arêtes de la maille. Il y a donc **1 site cubique en propre par maille**.

### 2.c) Rayon r du site en fonction du rayon R des atomes de polonium

Le diamètre  $\mathbf{d} = 2\mathbf{r}$  de l'atome qui peut se loger dans le site cubique est égal à :

$$d = 2r = (a\sqrt{3} - 2R) = (2R\sqrt{3} - 2R) = 2R(\sqrt{3} - 1)$$

Le rayon r du site est donc égal à :

$$r = R(\sqrt{3} - 1) = 0,732R$$

### 2.d) Réseau de Bravais si le site est occupé par un autre atome

Puisque l'atome en insertion dans le site cubique aura un diamètre égal à 0,732 fois le diamètre des atomes de polonium, ce sera un atome d'un élément autre que le polonium. Le

réseau de Bravais étant défini avec des atomes de même nature (ceux de polonium), le réseau reste donc **CUBIQUE SIMPLE**

**2.e) Indices de la direction tracée sur la figure du questionnaire.**

**2.f) Position des plans (111) et (011) dans la maille.**

Le plan (011) est parallèle à l'axe **x** ( $h = 0$ ) et coupe respectivement les axes **y** et **z** en **+1** et **+1** ( $k = 1; l = 1$ )

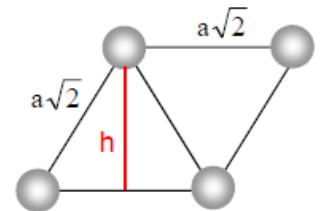
Le plan (111) coupe respectivement les axes **x**, **y** et **z**

en **+1** ( $h = 1$ ), **-1** ( $k = -1$ ) et **+1** ( $l = 1$ )

**2.g) Densité surfacique d'atomes de polonium dans le plan (111) :**

La maille plane élémentaire du plan est représentée ci-contre.

Elle contient **1 atome en propre** et sa surface est égale à :



$$S = ha\sqrt{2} \text{ avec } h^2 = (a\sqrt{2})^2 - (a\sqrt{2}/2)^2$$

Après simplification, on obtient :  $S = a^2\sqrt{3}$

La densité surfacique est donc égale à :  $1/a^2\sqrt{3} = 5,13 \text{ at/nm}^2$

**2.h) Masse volumique théorique  $\rho$  du polonium**

Masse des atomes en propre de la maille (1 seul) :

$$M = A\rho_0/N_A$$

Volume de la maille :  $V = a^3$

Masse volumique théorique :  $\rho = M/V = A\rho_0/(a^3 \cdot N_A)$

**Exercice n°8**

**a) Réseau de Bravais de GaAs**

Type de sites occupés par les atomes de As et en quelle proportion (en %) ?

Il est défini par la position des atomes de gallium (Ga)

Les atomes de As occupent des sites tétraédriques à l'intérieur de la maille CFC.  
Seulement 50 % de ces sites sont occupés.

### b) Plan (011) et sa densité surfacique d'atomes

Dessinez le plan dans la maille ci-dessous et donnez sa densité surfacique d'atomes :  
La surface de référence du plan (011) est le rectangle tracé ci-contre.

Nombre total  $n$  d'atomes en propre sur cette surface (incluant les atomes de Ga et ceux de As) :

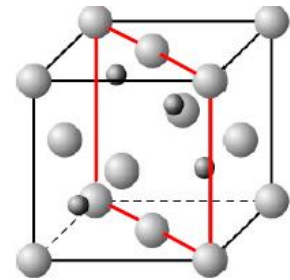
$$n = (4 \times \frac{1}{4}) + (2 \times \frac{1}{2}) + 2 = 4$$

$$\text{Surface de référence } S = a \cdot a \sqrt{2} = a^2 \sqrt{2}$$

$$\text{Densité atomique: } d = \frac{n}{S} = \frac{4}{a^2 \sqrt{2}} = \frac{2\sqrt{2}}{a^2}$$

$$d = \frac{2\sqrt{2}}{(0.565)^2}$$

$$d = 8,86 \text{ at/nm}^2$$



### c) Masse volumique théorique du GaAs

Nombre d'atomes de Ga appartenant en propre à la maille :

$$n_{\text{Ga}} = (8 \times \frac{1}{8}) + (6 \times \frac{1}{2}) = 4 \text{ atomes}$$

Nombre d'atomes de As appartenant en propre à la maille :  $n_{\text{As}} = 4 \times 1 = 4 \text{ at}$

Masse  $m$  des atomes en propre :

$$m = \frac{4(A_{\text{Ga}} + A_{\text{As}})}{N_A}$$

Où :  $A$  représente la masse molaire de l'élément

Volume de la maille :  $V = a^3$

Masse volumique :

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{4(A_{\text{Ga}} + A_{\text{As}})}{a^3 N_A}$$

$$\rho = 5,33 \text{ g/cm}^3$$

### Exercice n° 7 :

#### a) Indices de Miller des plans (a) et (b).

En annexe est présentée la disposition des ions Ca et F dans la maille élémentaire de la fluorite. Les plans (a) et (b) sont aussi mis en place dans cette maille, ce qui permet d'en déduire leurs indices de Miller respectifs. (a) : (110) et (b) : (101)

#### b) Indices de la direction définie par l'intersection des plans (a) et (b).

$$[111] \text{ ou } [\bar{1}\bar{1}\bar{1}]$$

En annexe, la direction commune aux plans (a) et (b) est mise en place dans la maille élémentaire, ce qui permet d'en déduire les indices de cette direction

#### c) Réseau de Bravais du fluorure de calcium.

Comme le révèle la maille élémentaire de la fluorite présentée en annexe, les ions Ca occupent les nœuds d'un **réseau de Bravais cubique à faces centrées (CFC)**, dans les sites duquel les ions F sont insérés.

#### d) Sites occupés par les ions F et proportion de ces sites occupés.

Comme le révèle la maille élémentaire de la fluorite présentée en annexe, les ions F sont insérés dans le réseau de Bravais cubique à faces centrées (CFC) défini par les ions Ca. Chaque ion F est entouré par 4 ions Ca, l'un d'eux occupant un sommet de la maille cubique, les trois autres étant situés au centre des faces qui définissent ce sommet. Ces quatre ions Ca délimitent donc un **site tétraédrique**.

On constate qu'il y a 8 ions F occupant de tels sites. D'autre part, comme un site tétraédrique est associé à chaque sommet de la maille et que cette maille possède 8 sommets, **tous les sites tétraédriques (100%)** sont donc occupés.

#### e) Motif du fluorure de calcium.

**Le motif doit refléter la proportion des ions Ca et F qui appartiennent en propre à la maille élémentaire.**

Nombre d'ions Ca appartenant en propre à la maille :  $(8 \times 1/8) + (6 \times 1/2) = 4$

Nombre d'ions F appartenant en propre à la maille : 8

Il y a deux fois plus d'ions F que d'ions Ca dans le motif. **Le motif est donc constitué d'un ion Ca et de deux ions F.** Ce motif est mis en évidence à la figure donnée en annexe et l'on en déduit ainsi les coordonnées relatives des ions constituant le motif.

| Ion | Coordonnées relatives |     |     |
|-----|-----------------------|-----|-----|
|     | x                     | y   | z   |
| Ca  | 0                     | 0   | 0   |
| F   | 1/4                   | 1/4 | 1/4 |
| F   | 1/4                   | 3/4 | 1/4 |

**f) Masse volumique théorique du fluorure de calcium.**

Nombre d'ions Ca appartenant en propre à la maille :  $(8 \times 1/8) + (6 \times 1/2) = 4$

Nombre d'ions F appartenant en propre à la maille : 8

Masse des ions en propre :  $M = (4A_{Ca} + 8A_F)/N_A$

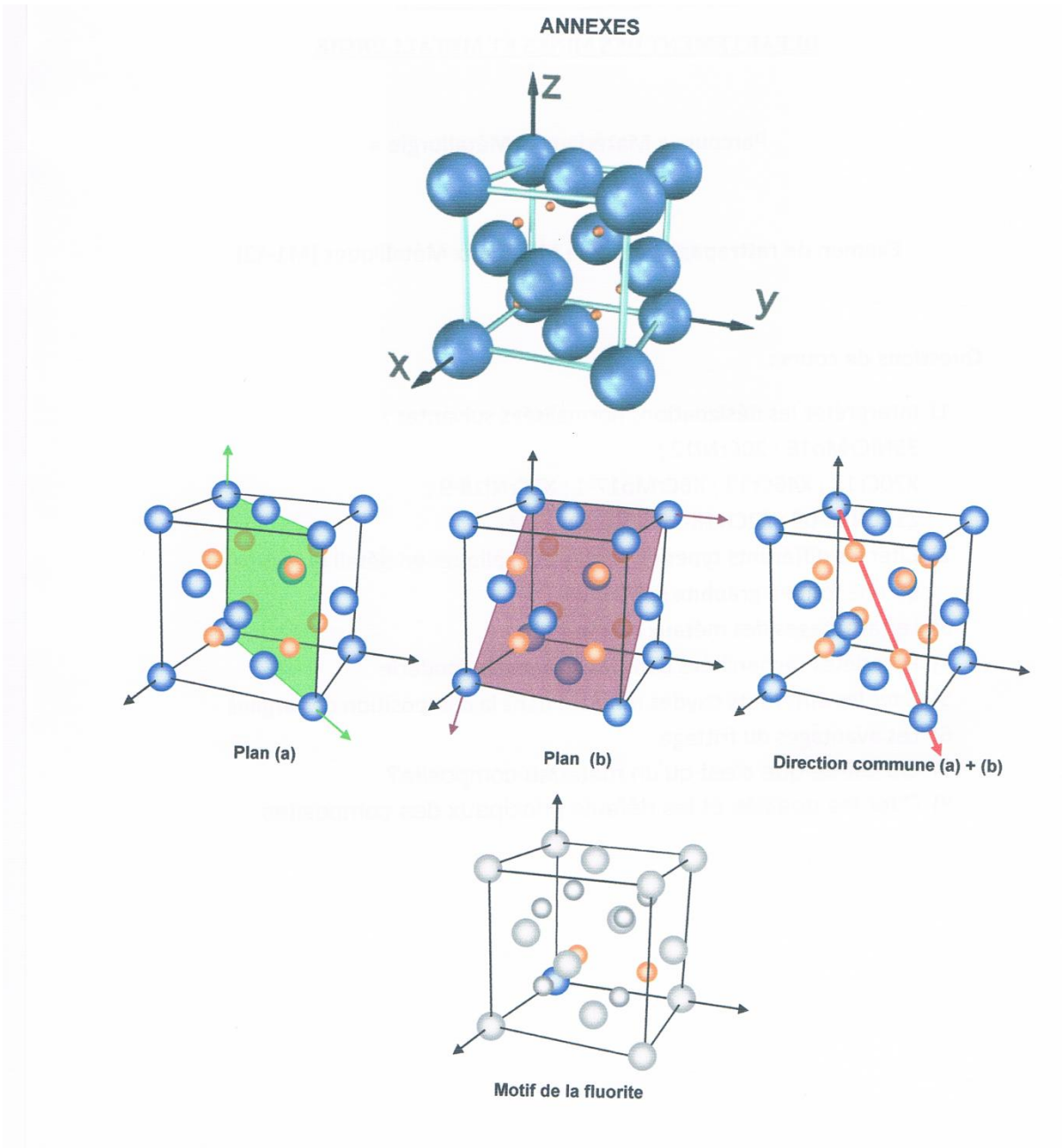
$$= (4 \times 40,08 + 8 \times 19) / (6,022 \times 10^{23}) \text{ g} = 5,186 \times 10^{-22} \text{ g}$$

Volume de la maille élémentaire :

$$V = a^3 = (0,545 \text{ nm})^3 = 0,1619 \text{ nm}^3 = 1,619 \times 10^{-22} \text{ cm}^3$$

Masse volumique théorique de la fluorite :

$$\rho = M/V = (5,186 \times 10^{-22}) / (1,619 \times 10^{-22}) = \mathbf{3,20 \text{ /cm}^3}$$



## Exercice n° 12

a) Nombre de réactions eutectiques dans le diagramme Sn – Au et caractéristiques d’une de ces réactions :

| Réaction | Température (°C) | Phases en présence | Composition (%m Au) |
|----------|------------------|--------------------|---------------------|
| 1        | 217              | Liquide            | 9                   |
|          |                  | $\alpha$           | 0,6                 |
|          |                  | $\beta$            | 29,3                |
| 2        | 289              | Liquide            | 79,4                |
|          |                  | $\delta$           | 62,3                |
|          |                  | $\zeta$            | 88,1                |

b) Verticale notée  $\beta$ :

| Composant | Réaction eutectoïde | Réaction eutectique | Composé défini stœchiométrique | Composé défini non stœchiométrique |
|-----------|---------------------|---------------------|--------------------------------|------------------------------------|
|           |                     |                     | <b>X</b>                       |                                    |

c) Formule chimique de la phase  $\gamma$  :

La composition massique de la phase  $\gamma$  est égale à  $C_m = 45,5\% \text{ m Au}$ . On peut donc écrire

$$C_m = \frac{A_{\text{Au}} n_{\text{Au}}}{A_{\text{Au}} n_{\text{Au}} + A_{\text{Sn}} n_{\text{Sn}}}$$

Où :

$$x = n_{\text{Au}} / n_{\text{Sn}} = \frac{A_{\text{Sn}} C_m}{A_{\text{Au}} (1 - C_m)} = 0,502 \cong \frac{1}{2}$$

**Donc : X = 2 et Y = 1**

**A** représente la masse atomique et **n** le nombre d’atomes d’un composant.

En réarrangeant la relation ci-dessus, on obtient ainsi le rapport **x = nAu/nSn** égal à :

**Il y a donc 1 atome de Au pour 2 atomes de Sn**

**Formule : AuSn<sub>2</sub>**

**d) Constituant présents à 216,9 °C dans un alliage Sn + 20 %m Au**

| Constituant                   | Composition (%mAu) | Proportion (%m)  |
|-------------------------------|--------------------|--|
| β primaire (ou proeutectique) | 29,3               | $f_{\beta} = (1 - f_{eut}) = 54,2$   |
| Eutectique (α + β)            | 9                  | $(f_{eut})_{216,9^{\circ}\text{C}} = (f_{liq})_{217,1^{\circ}\text{C}}$<br>$(f_{liq})_{217,1^{\circ}\text{C}} = (29,3 - 20)/(29,3 - 9) = 45,8$ |

**e) Solubilité maximale de Sn dans Au (exprimée en %m Sn) :**

$$[\% \text{ max Sn}]_{\text{Au}} = 4,6 \% \text{ m.Sn}$$

**f) Alliages riches en Au se prêtant au durcissement structural :**

Pour qu'un alliage puisse se prêter à un traitement de durcissement structural, il faut qu'au moins deux conditions soient satisfaites selon le diagramme d'équilibre :

- 1) l'élément d'alliage (ici Sn) doit être mis en solution solide d'équilibre à haute température dans la matrice (ici l'or).
- 2) la solution solide d'équilibre à haute température peut être trempée sans subir de changement de structure cristalline (changement de phase allotropique).

Ces deux conditions sont satisfaites pour des alliages d'or ayant au maximum 5,4 % d'étain. Un alliage de composition égale à (96 %m Au + 4 %m Sn)

### Exercice n°15

**a) Nombre de points eutectiques et leur température.**

| Point | Température (°C) |
|-------|------------------|
| 1     | 596              |
| 2     | 177              |

**b) Composés définis et leur stœchiométrie.**

Donnez le symbole ou la formule chimique du composé défini et répondez par **OUI** ou **NON** pour sa stœchiométrie.



| Composé                              | Stœchiométrique |
|--------------------------------------|-----------------|
| $\beta$                              | NON             |
| $\gamma$                             | OUI             |
| E (Al <sub>4</sub> Li <sub>9</sub> ) | OUI             |

c) **Formule chimique de la phase.**

Exprimée en % **atomique**, la composition de la phase  $\gamma$  est égale à **60 %** (Lecture sur l'échelle horizontale du haut de la figure).

Par conséquent, le rapport **Al/Li** de cette phase est égal à  $40/60 = 2/3$ .

La formule chimique est donc : **Al<sub>2</sub>Li<sub>3</sub>**

d) **Composition nominale C<sub>0</sub>.**

$$C_0 = 45 \% \text{ m Li}$$

e) **Teneur théorique maximale des alliages Al – Li.**

C'est la solubilité maximale du Li dans l'aluminium solide (phase  $\alpha$ ).

Selon le diagramme, on obtient :

$$C_{\max} = 4 \% \text{ mLi}$$

f) **Température optimale de mise en solution des alliages Al – Li.**

Selon le diagramme, on obtient : **T = 596 °C**

**Exercice n° 16 :**

a) **Type de fonte.**

|                       |                          |                       |                                     |
|-----------------------|--------------------------|-----------------------|-------------------------------------|
| Fonte eutectoïde      | <input type="checkbox"/> | Fonte eutectique      | <input type="checkbox"/>            |
| Fonte hypoeutectoïde  | <input type="checkbox"/> | Fonte hypoeutectique  | <input checked="" type="checkbox"/> |
| Fonte hypereutectoïde | <input type="checkbox"/> | Fonte hypereutectique | <input type="checkbox"/>            |

b) **Température de début et de fin de solidification.**

Voir figure en annexe

|       | Température (°C) |
|-------|------------------|
| Début | 1480             |
| Fin   | 1400             |

**b) Phases en présence à 1000°C, Voir figure en annexe**

| Phase                  | Composition (%m.C) | Proportion (%m)               |
|------------------------|--------------------|-------------------------------|
| Austénite ( $\gamma$ ) | 1,6                | $(6,68-3)/(6,68-1,6)= 72,4\%$ |
| Cémentite ( $Fe_3C$ )  | 6,68               | $(3-1,6)/(6,68-1,6)=27,6\%$   |

**c) Constituants en présence à 722 °C.**

| Constituant           | Composition (%m.C) | Proportion (%m)              |
|-----------------------|--------------------|------------------------------|
| Perlite               | 0,8                | $(6,68-3)/(6,68-0,8)=62,6\%$ |
| Cémentite ( $Fe_3C$ ) | 6,68               | $(3-0,8)/(6,68-0,8)=37,4\%$  |

**e) Refroidissement à l'équilibre de 722 à 20 °C.**

Cochez la(les) case(s) appropriée(s).

|  |                                     |
|--|-------------------------------------|
| Les phases existant à 722°C n'évoluent plus au cours du refroidissement          | <input type="checkbox"/>            |
| La perlite se décompose progressivement en ferrite $\alpha$ en cémentite $Fe_3C$ | <input type="checkbox"/>            |
| Il ya précipitation fine de cémentite dans ou autour de la ferrite               | <input checked="" type="checkbox"/> |
| La cémentite se décompose en ferrite et en perlite                               | <input type="checkbox"/>            |
| La ferrite s'appauvrit en carbone  | <input checked="" type="checkbox"/> |

## Exercice n° 17

a) Transformations allotropiques du fer pur à l'état solide

|                  |                                 |                                 |
|------------------|---------------------------------|---------------------------------|
| Température (°C) | 910                             | 1394                            |
| Transformation   | $\alpha \leftrightarrow \gamma$ | $\gamma \leftrightarrow \delta$ |

b) Microstructure d'un acier à 0,6 %m. C à diverses températures

|                  |      |      |     |    |
|------------------|------|------|-----|----|
| Température (°C) | 1460 | 1400 | 724 | 20 |
| Microstructure   | e    | c    | f   | h  |

c) Phases et proportions dans un acier eutectoïde à 20 °C

|               |    |                   |
|---------------|----|-------------------|
| Phase         | α  | Fe <sub>3</sub> C |
| Proportion(%) | 88 | 12                |

d) Températures de début et de fin de solidification d'un acier eutectoïde

|  |
|--|
| $\Theta_d = 1300 \pm 10^\circ\text{C}$ |
| $\Theta_f = 1147^\circ\text{C}$        |

e) Microstructure d'un acier eutectoïde à 1420 °C

|            |
|------------|
| Schéma = e |
|------------|

## Exercice n° 18

**a) Composition nominale de l'acier en carbone.**

Connaissant la valeur des fractions massiques soit de ferrite ( $f_\alpha$ ), soit de cémentite ( $f_{\text{Fe}_3\text{C}}$ ), on applique la règle des bras de leviers afin d'en déduire la composition nominale  $C_0$  de l'acier. En raisonnant par exemple avec la ferrite, on obtient ainsi :  $f_\alpha = (C_{\text{Fe}_3\text{C}} - C_0) / (C_{\text{Fe}_3\text{C}} - C_\alpha) \rightarrow C_0 = C_{\text{Fe}_3\text{C}} - f_\alpha(C_{\text{Fe}_3\text{C}} - C_\alpha)$ .  
A température ambiante, la solubilité du carbone dans la ferrite est négligeable et  $C_\alpha \cong 0$ .

Donc  $C_0 \cong C_{\text{Fe}_3\text{C}} - f_\alpha(C_{\text{Fe}_3\text{C}}) = 6,68 - (0,913 \times 6,68) = 0,58 \text{ \%m C}$

**b) Phases en présence à 724 °C**

| Phase                  | Composition (%C) | Proportion (%m) |
|------------------------|------------------|-----------------|
| Austénite ( $\gamma$ ) | 0,8              | 71,9            |
| Ferrite ( $\alpha$ )   | 0,002            | 28,1            |

### c) Fraction massique de perlite à 20 °C

La perlite se forme à 723 °C au cours de la réaction eutectoïde que subit l'austénite présente à 724 °C. Par conséquent la fraction massique de perlite est égale à la fraction massique d'austénite présente à 724 °C et calculée à la question ci-dessus.

$$f_P = 71,9 \%m$$

### d) Constituants et dureté de l'acier après traitement thermique

| Traitement | Constituants      | Dureté (HRC) |
|------------|-------------------|--------------|
| 1          | Ferrite           | 14           |
|            | Perlite grossière |              |
| 2          | Martensite        | 62           |
| 3          | Bainite           | ND           |
|            | Martensite        |              |

### Exercice n° 20

- a) La réponse à la première question, voir figure ci-dessous
- b) Le laiton 70/30 est monophasé, alors que le laiton 60/40 est biphasé
- c) Le laiton 70/30 commence à fondre à 920°C et est complètement liquide à 950°C. Le laiton 60/40 commence à fondre à 895°C et est complètement liquide à 898°C
- d) A 200°C :  $\alpha$  (solide riche en cuivre) et  $\beta$  (approximativement CuZn).
- e) A 800°C :  $\beta$   
Le  $\alpha$  s'est dissous dans le  $\beta$

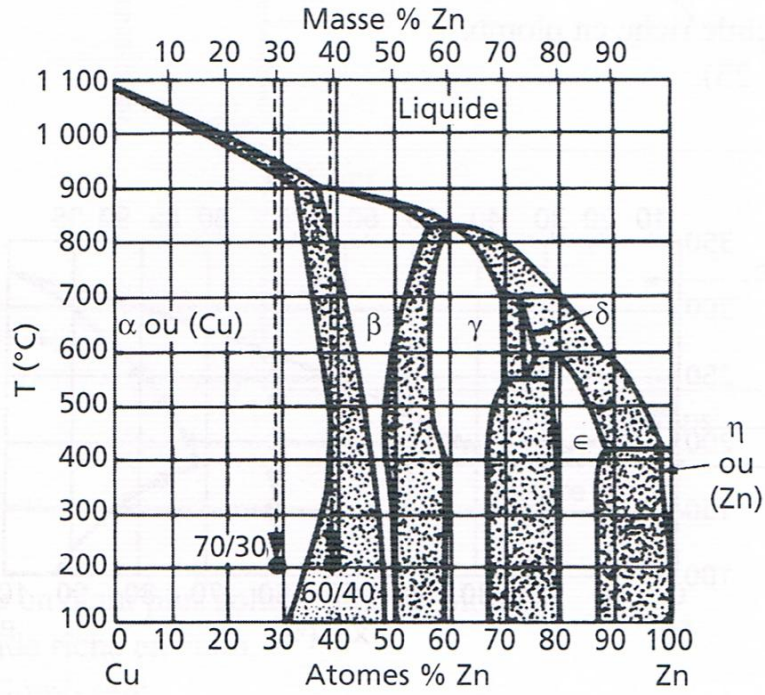


Diagramme Cu-Zn [15]

## BIBLIOGRAPHIE

1. Schragar, Arthur M., Elementary Metallurgy and Metallography, 3rd Ed., (1969).
2. Philippe Lours, Au cœur des matériaux cristallins, Paris ; Presses des Mines, Collection Sciences de la matière, 2016
3. Michel Colombié, matériaux métalliques, 2ème Edition DUNOD, Paris 2008
4. Abbas Belfar, cours et exercices de cristallographie, photocopié, USTO, 2014
5. William D. Callister Jr. Fundamentals of Materials Science and Engineering, Wiley editor. 2001
6. A. RASKIN, Rappels atomistiques, structure des métaux, des alliages et des céramiques Société Francophone des Biomatériaux Dentaires (SFBD), 2010
7. Jean P. Mercier, Gérard Zambelli, Wilfried Kurz, Introduction à la science des matériaux, Presses polytechniques et universitaires romandes, Lausanne, 2002
8. DOUIN Joel, Mécanique des milieux continus; Introduction à la plasticité des matériaux, Edition Diderot - 1997
9. Loyd, Lowell, Plastic Deformation and Annealing of Metals, ASM International, (1987).
10. B. JACQUOT, Propriétés mécaniques des Biomatériaux utilisés en Odontologie, Société Francophone des Biomatériaux Dentaires (SFBD), 2010
11. Michael F. Ashby and David R. H. Jones, matériaux, propriétés et applications, DUNOD, Paris, 2008
12. <http://deuns.chez.com/sciences/cristallo/defauts41.html>
13. Frédéric Momprou, Arc, corde et tension de ligne, Copyright 2017
14. J. Benard, A. Michel, J. Philibert et J. Talbot, Métallurgie générale, 2ème Edition, Masson, Paris 1984
15. Michael F. Ashby and David R. H. Jones, matériaux, microstructures, mise en œuvre et conception DUNOD, Paris, 2008
16. Nazé L. Matériaux pour l'ingénieur, Ecoles des mines, 2006
17. Michel Dequatremare, Thierry Devers, Précis des matériaux, DUNOD, Paris 2012
18. Guy Murry, Aide mémoire de Métallurgie, Usine nouvelle Edition DUNOD, Paris, 2010
19. Chaussin C. et Hilly G. Métallurgie, DUNOD, Paris, 1996

## Métallurgie : Cours et exercices corrigés

---

20. J.Philibert, A.Vignes, Y.Brechet et P.Combrade, Métallurgie : du minerai au matériau. Masson, Paris. 1998
21. C.Delphine, Introduction à la cristallographie, Dunod, Paris, 1971
22. Ecole Polytechnique Montréal, Programme de génie des matériaux, Cours ING3035 – Matériaux.
23. Jean Barralis, Gérard Maeder, Métallurgie : Elaboration, structures-propriétés, normalisation, Edition Nathan
24. O. Alexander, E. Animalu, Intermediate quantum theory of crystalline solids, Massachusetts Institute of Technology, Prentice-Hall, Inc., 1977
25. Source des illustrations : Internet, personnel, de certains ouvrages cités ci-dessus.
26. P. MILLET, Société Francophone de Biomatériaux Dentaires, support de cours, diagrammes des phases, 2010
27. William D. Callister Jr. Fundamentals of Materials Science and Engineering, Wiley editor. 2001
28. Jean HERTZ, Diagrammes d'équilibre- Alliages binaires, Techniques de l'ingénieur, Réf : M70 v2, 1999.
29. Philippe Lours, Au cœur des matériaux cristallins, Paris ; Presses des Mines, Collection Sciences de la matière, 2016
30. <http://www.fonderiesalin.com/index.php?p=mat>
31. Kaur I., Gust V. Diffusion on the boundaries of grains and phases, Mechanical Engineering, 1991
32. C.Chaussin, G.Hilly, métallurgie Tome 1, alliages métalliques, DUNOD, Paris 1986