

Constitution des métaux et des alliages

Etat métallique

1- Structure des métaux et des alliages

— L'étude de la constitution des métaux et des alliages industriels permet de distinguer 3 ordres de structure :

- a) La structure macrographique : "macrostructure"
- b) La structure micrographique : "microstructure"
- c) La structure "cristalline"

1-1 La MAGROGRAPHIE

1-1-1 Définition : Examen d'ensemble d'une pièce (ou d'une fraction de pièce) fait à l'œil nu ou à faible grossissement (à la loupe).

1-1-2 Technique de la macrographie :

a) Le Polissage : Il comporte une étape de "dégrossissage" (à la lime ou à la meule) suivie d'un "finissage" au papier émeri fin.

b) L'attaque :

— La face polie de l'échantillon est en premier lieu "dégraissée" à l'alcool (pour assurer la régularité) d'action du réactif) puis "séchée".

— Cet échantillon est ensuite "plongé" dans le réactif (ou badigeonné au pinceau).

— L'attaque permet de mettre en évidence certains constituants ou défauts de surface

— Quelques principaux réactifs:

- * NITAL (alcool + 1 à 5% d'acide nitrique)
- * PICRAL (alcool + 4% d'acide picrique)

* Le réactif de STEAD (à base d'acide sulfurique).

c) L'enregistrement :

— Après l'attaque, la pièce est "rinée" et "séchée" en vue de son observation.

— La face attaquée est soit :

* photographiée

* imprimée sur feuille de papier amible
(méthode de Baumann)

1.1.3 Application de la macrographie

— On pratique la macrographie aussi bien sur des sections de lingots bruts de coulée que sur des produits finis (rails - crochets - chaînes - - - -)

— Son objet principal est de :

- * mettre en évidence les hétérogénéités
- * renseigner sur l'organisation structurale (macrostructure)
- * renseigner sur les irrégularités de composition chimique
- * renseigner sur le mode de fabrication (laminage - forgeage - sondage - usinage - - - -)

1-2 La MICROGRAPHIE

1-2-1 Principe : Examen au microscope d'une surface polie et attaquée par des réactifs liquides

- grossissement de l'ordre de 200 à 500 (jusqu'à 1500)
- Surface examinée de l'ordre du " cm^2 ".

NB: les échantillons sont souvent enrobés de "bakélite" qui leur sert de support.

1.2.2 Technique de la micrographie

a) Le meulage : Il a pour but d'obtenir une surface bien dressée : (meule au carborandum à 1600 tr/mn) avec arrosage abondant.

b) Le digrossissage : Il a pour but d'amener la surface plane à un état de poli presque parfait
→ à l'aide de papier emeri très fin.
(N° 2 à N° 0000)

c) Le finissage : Il a pour but d'obtenir un poli "spéculaire" (poli parfait → miroir).
→ à l'aide de disques de feutre constamment mouillés par une suspension d'alumine dans l'eau (parfois pâte diamantée).

d) L'attaque : Les réactifs chimiques sont très nombreux et peuvent être les mêmes que pour la macrographie (nitral - picral - Eau de régale ----).
Après attaque lavage abondant puis séchage.

e) L'observation :

* Microscope métallographique : - le plus courant.

- éclairage de l'échantillon par réflexion.

- grossissements les plus courants 200 à 500 fois

* Microscope électronique : C'est un faisceau d'électrons qui "irradie" l'échantillon - Très coûteux et peu répandu - Grossissement pouvant atteindre facilement 300.000.

1.2.3 : Application de la Micrographie

- * Détermination des constituants d'un alliage
 - (identification des constituants, des phases, de leur répartition, de leur forme)
- * Contrôle des traitements
 - (mécaniques, thermiques, chimiques)
- * Mesure de la grosseur des grains
 - (permet d'analyser les phénomènes liés à la cristallisation d'un alliage et aux traitements thermiques)

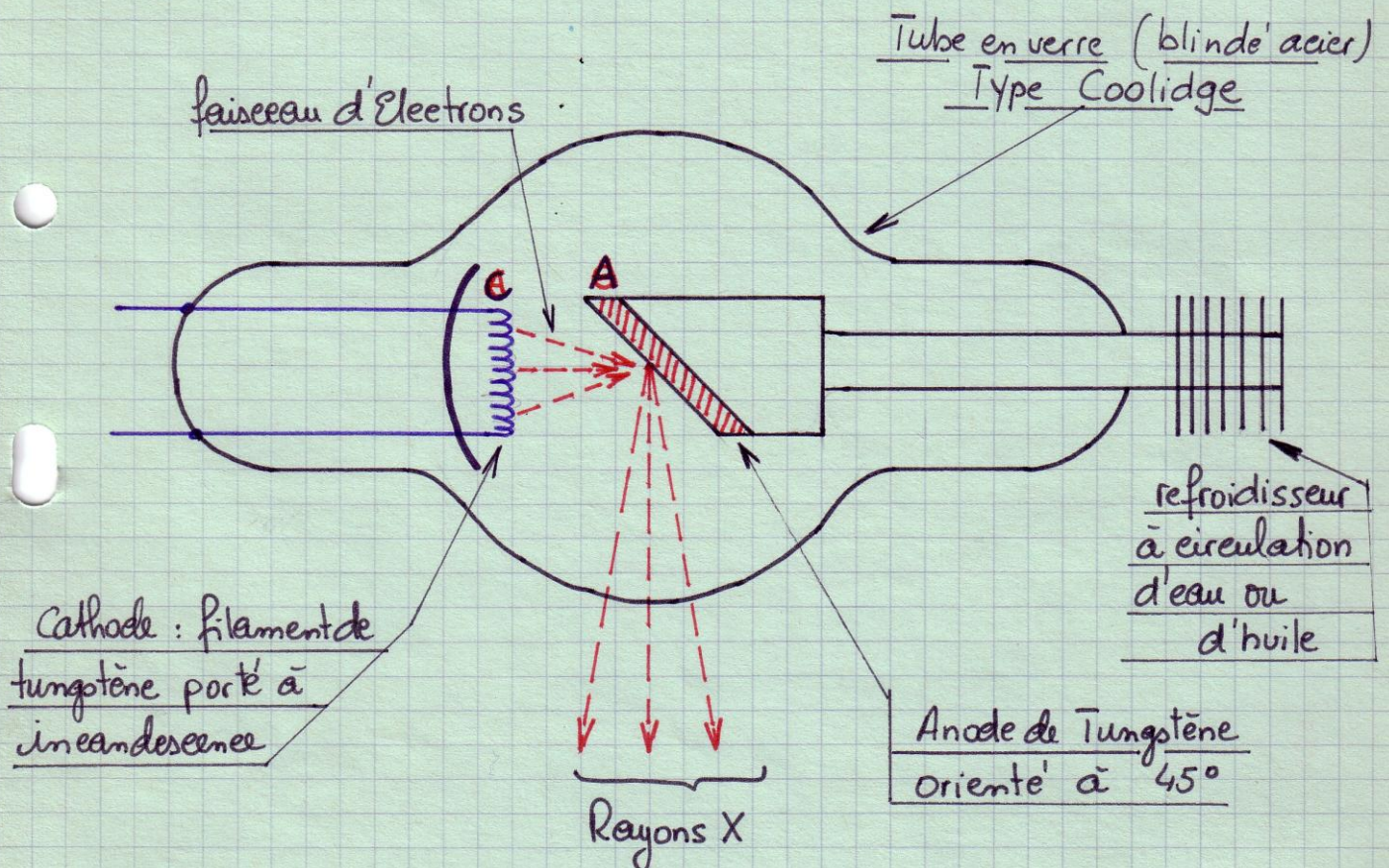
1.3 La Radiométallographie

1.3.1 Définition : Examen métallurgique qui utilise les propriétés relatives à l'absorption des rayons X.

→ Technique analogue à la radiographie médicale

1.3.2 Émission des rayons X

- les rayons "X" sont des rayonnements électromagnétiques ($\lambda \approx 10^{-8} \text{ cm}$) analogues à la lumière ($\lambda \approx 10^{-4} \text{ cm}$)
- l'émission des rayons "X" est due au choc d'un faisceau d'électrons rapides sur un obstacle matériel



- À l'intérieur du ballon en verre un vide d'air règne. ($\sim$ de 10^{-6} mm de mercure).
- des électrons sont accélérés par une forte tension ($\sim$ de 100 à 2000 kV), se dirigent sur la pastille de tungstène qui émet un rayonnement X.

1.3.3 : Applications métallurgiques

- * la radiométallographie est un "essai non destructif"
- * Détection des défauts internes (sur plaque photographique)
 - Contrôle des soudures (homogénéité du cordon)
 - Contrôle des montages (étude de la compacité)
 - analyse des cavités
- * Détermination des structures cristallines
 - renseigne sur la structure interne des constituants micrographiques

1.4 : La Gammaradiographie

1.4.1 : Radioactivité

- Certains corps simples dits "radioactifs" se désintègrent spontanément en donnant naissance à de nouveaux corps simples :

Ex : le Radium ($Z=226$) se désintègre en donnant des noyaux d'Hélium ($Z=4$) et du gaz Radon ($Z=222$) qui se désintègre à son tour.

- D'une façon générale les substances radioactives peuvent émettre trois sortes de radiations :

- 1°) des rayons α : ce sont des noyaux d'Hélium
- 2°) des rayons β : électrons (animés de $V \approx 100.000 \text{ km/s}$)
- 3°) des rayons γ : radiations électromagnétiques ($\lambda \approx 10^{-10} \text{ cm}$)

1.4.2 : Applications métallurgiques

- des rayons " γ " sont plus pénétrants que les rayons X
 - aciers jusqu'à 30 cm ; ~~¶~~ Plomb → 10 cm
- Mêmes applications que la radiométallographie
- les radiations " γ " sont dangereuses
 - protection de l'opérateur.

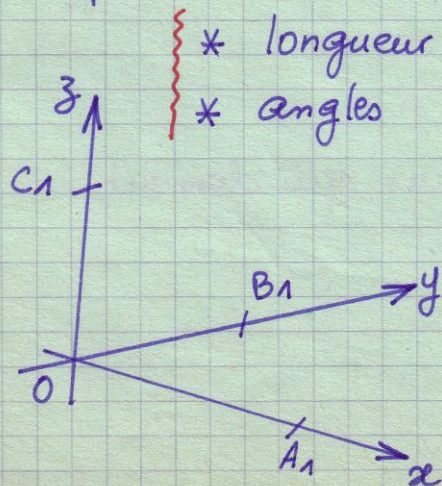
2 - Structure cristalline

2-1 : Définitions

- ✓ - L'emploi des rayons "X" a permis d'établir qu'ils sont formés de matière cristallisée.
- ✓ - Etat cristallin: c'est un état qui est caractérisé par la distribution régulière de particules (ions) matérielles dans l'espace selon un système constitué de parallélépipèdes identiques et contigus.
- ✓ - Maille: parallélépipède unité qui définit le système
Ex: maille cubique - maille hexagonale.
- ✓ - Cristal: Empilement de très nombreuses mailles, identiques, adjacentes, occupant un volume limité.
Cet arrangement constitue un motif qui se répète périodiquement dans 3 directions de l'espace.
- ✓ - NB: L'ensemble des mailles élémentaires s'appelle un "réseau cristallin".

✓ Les sommets en sont les nœuds.

→ Le système cristallin (réseau) est défini par les paramètres suivants de la maille:



$$\overline{OA_1} = a$$

$$\overline{OB_1} = b$$

$$\overline{OC_1} = c$$

" α " angle de a et b

" β " angle de b et c

" γ " angle de c et a

2-2 : Liaison métallique

* L'atome métallique présente 2 caractéristiques particulières :

- a) orbite extérieure ne contenant qu'un petit nombre d'électrons de valence.
- b) orbite relativement éloignée du noyau
 - ⇒ des électrons sont faiblement liés au noyau
 - ⇒ l'atome métallique a tendance à perdre ses électrons de valence
 - ⇒ Il devient un "ion positif" (cation)

* Liaison métallique : un cristal doit-être considéré comme un assemblage de cations entourés d'un nuage d'électrons

* Rôle des électrons libres :

- les électrons se meuvent facilement entre les interstices laissés par les ions (agitation électronique)
- C'est cette mobilité des électrons qui expliquent la forte conductibilité électrique et thermique des métaux
- La rigidité (ou cohésion) du métal est due à l'attraction exercée entre les électrons et les cations.

⇒ Liaison non dirigée et forte.

Ce sont les forces électrostatiques qui donnent la cohésion.

CONSTITUTION de l'ATOME

10) Définition : L'atome est la plus petite quantité de matière qui présente les caractères individuels d'un corps simple.

→ Une mole d'atomes est une quantité arbitraire contenant $N = 6,02 \times 10^{23}$ atomes réels $\Rightarrow N$: nombre d'Avogadro

→ La masse en grammes d'une mole est la "masse atomique" (A)

Ex : C $\rightarrow$ 12.
H $\rightarrow$ 1.
O $\rightarrow$ 16.

Mendeleïev

20) Constituants de l'Atome :

a) de Noyau : assimilable à une sphère de rayon $r \approx 10^{-13}$ cm

→ Formé de 2 types de particules :

* Les Protons : $m_p = 1,67 \times 10^{-27}$ Kg
 $+e = 1,6 \times 10^{-19}$ C

* Les Neutrons : $m_n \approx m_p$
 $e = 0$

b) des Electrons : sphère d'un rayon assimilable à celui du noyau.

masse : $m = 0,91 \cdot 10^{-30}$ Kg

→ gravité dans un espace sphérique autour du noyau à une distance $d \approx 10^{-5}$ cm ont une sphère de rayon $\approx 10^{-8}$ cm.

$-e = 1,6 \times 10^{-19}$ C

30) Charge et masse d'un atome

a) Charge : Dans un atome, le Nbre d'électrons est égal au Nbre "Z" de protons
 $\Rightarrow$ Charge électrique totale d'un atome est nulle.

$\rightarrow$ le Nbre d'électrons (Z) caractérise le "nombre atomique" d'un atome :

Ex : $\begin{array}{l} \text{Al} \rightarrow Z = 13 \\ \text{Fe} \rightarrow Z = 26 \\ \text{Cu} \rightarrow Z = 29 \end{array} \right) \text{Mendeleiev}$

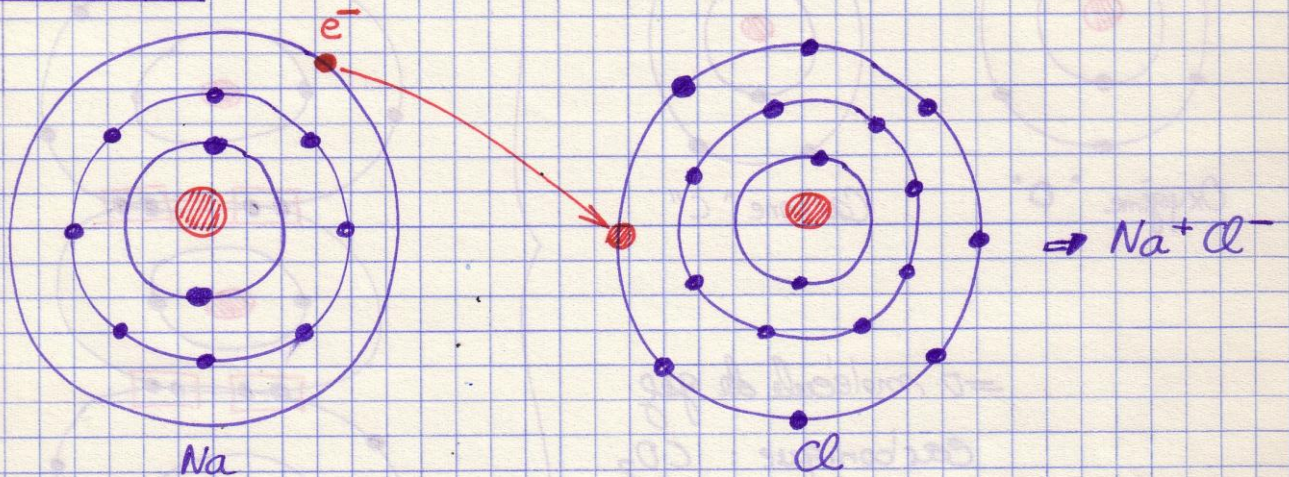
b) Masse : la masse des électrons étant négligeables devant celle des protons
 $\Rightarrow$ la masse de l'atome étant concentrée dans le noyau.

LIAISON IONIQUE (hétéropolaire)

* Définition : Elle résulte d'un transfert d'électrons entre 2 ou plusieurs atomes qui du fait de ce transfert deviennent des ions.

→ dans la liaison ionique, il n'y a aucun électron libre.

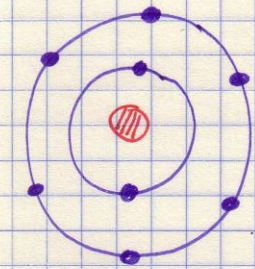
* Exemple :



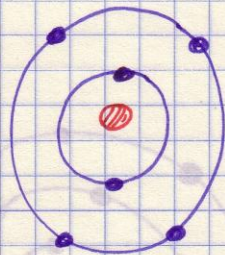
→ liaison atomique la plus faible.

LIAISON COVALENTE (homopolaire)

* Définition: Liaison entre 2 atomes A et B qui vont échanger (mettre en commun) leurs électrons de valence pour compléter à 8 leurs couches extérieures.

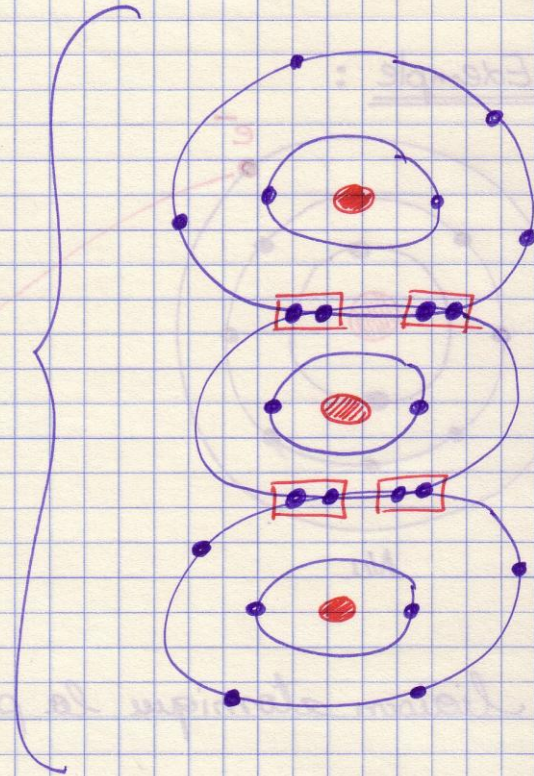


Oxygène "O"



Carbone "C"

=> molécule de gaz
carbonique : CO_2
(4 liaisons covalentes)



=> Liaison atomique solide

3 - Maille des métaux purs

3-1 : Définitions

3.1.1 - COORDINANCE

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

3.1.2 - COMPACTE

- Rapport du volume des sphères ioniques au volume de la maille élémentaire.

3.1.3 : Direction cristallographique

- Toute droite reliant 2 noeuds, en rencontre une infinité et définit une direction cristallographique.

3.1.4 : Plan cristallographique (ou réticulaire)

- Plan passant par 3 noeuds non situés en ligne droite et passant par une infinité de noeuds.

3-2 : Système cubique centré (C.C)

- La maille est un cube d'arête " a " ($a \approx 0,3 \mu\text{m}$)
- les centres des ions⁺ se trouvent aux sommets du cube et au centre du cube.

$\Rightarrow$ on compte 2 volumes atomiques par cube (par maille) : chaque ion central compte pour un atome, chaque ion du sommet compte pour $1/8$ d'atome (il y a 8 sommets).

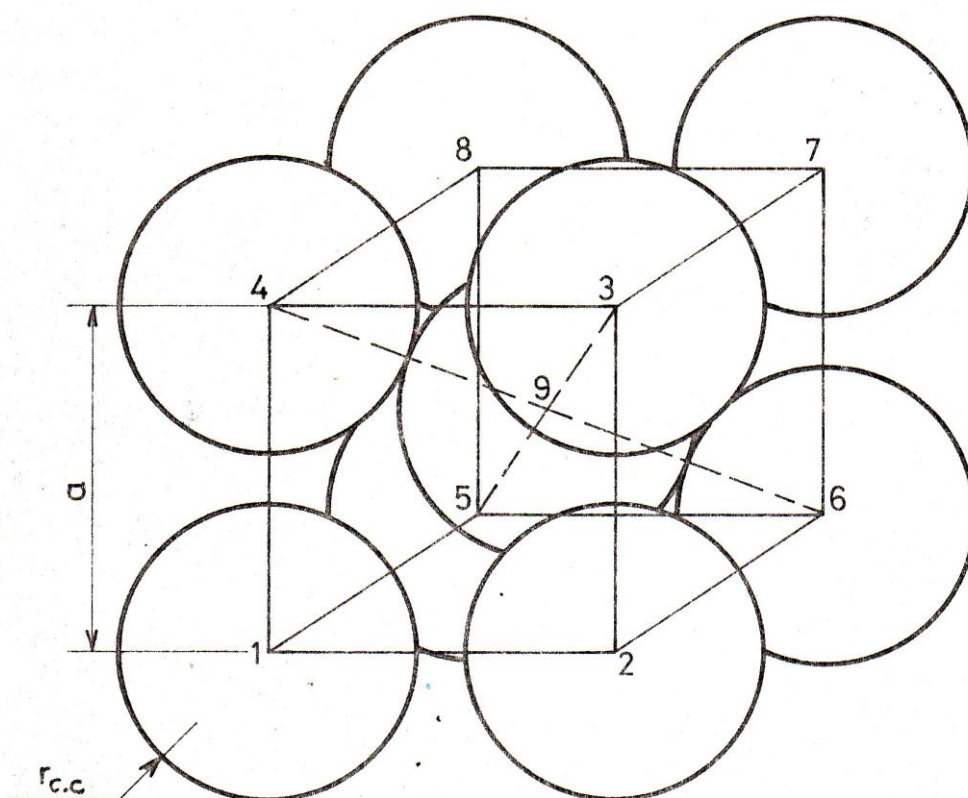
- les sphères ioniques sont tangentes le long des diagonales du cube :

$$1.4 = a$$

$$1.6 = a\sqrt{2}$$

$$\text{d'où } 4.6 = a\sqrt{3}$$

Systeme Cubique Centré (c.c)



— Valeur du rayon ionique : suivant la diagonale il y a 3 sphères tangentes (Ex: 4;9;6)

$$\text{Rayon ionique } r_{c.c} = \frac{a\sqrt{3}}{4}$$

— Coordination :

8

— Compacité :

$$\frac{\text{Volume occupé par les ions}}{\text{Volume de la maille}} = \frac{2 \times \frac{4}{3}\pi \times \left(\frac{a\sqrt{3}}{4}\right)^3}{a^3} = 0,68$$

— Exemples de métaux : Fer α - Chrome - Tungstène
Molybdène - Vanadium - Manganèse - Tantale
 → Il s'agit de métaux particulièrement résistants

ETAT METALLIQUE

Doc : 01

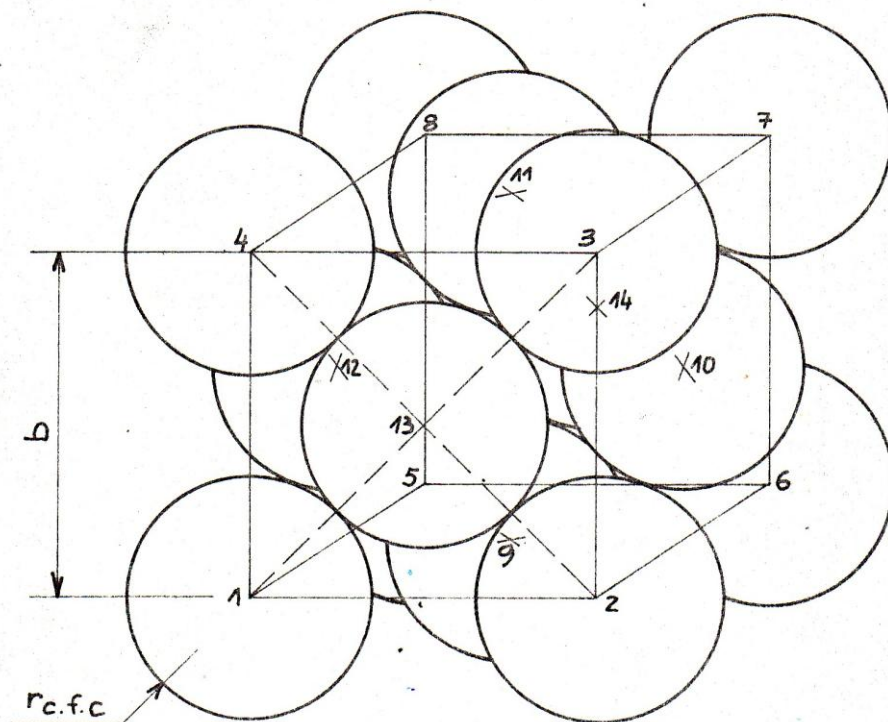
3.3: Système cubique à faces centrées (C.f.c)

- la maille est un cube d'arête " b " ($b \approx 0,35 \mu\text{m}$)
- les centres des ions⁺ occupent les sommets et les centres des faces.

⇒ on compte 4 volumes atomiques par maille :
1 atome pour les sommets + 3 atomes pour les faces.

- les sphères ioniques sont tangentes le long des diagonales des faces:
 $1 \cdot 4 = b$
 $1 \cdot 3 = b\sqrt{2}$

Systeme Cubique à Faces Centrées (c.f.c)



— Valeur du rayon ionique : des sphères ioniques sont tangentes le long des diagonales des faces (4; 13; 2).

$$\text{Rayon ionique } r_{c.f.c} = \frac{b\sqrt{2}}{4}$$

→ Coordinance : 12

— Compacité :
$$\frac{\text{Volume occupé par les ions}}{\text{Volume de la maille}} = \frac{4 \times \frac{4}{3}\pi \times \left(\frac{b\sqrt{2}}{4}\right)^3}{b^3} = \text{0,74}$$

— Exemple de métaux : Fer γ - Aluminium - Nickel
Cuivre - Argent - Or - Plomb

→ Il s'agit de métaux ductiles et malliables.

ETAT METALLIQUE

Doc : 02

3-4 : Système hexagonal compact (h-c)

— La maille est un prisme droit à base losange (côté "a" - angles 60° et 120°).

On considère généralement l'ensemble de trois de ces prismes.

— les centres des ions occupent :

- * les sommets du prisme
- * le centre des bases
- * les centres des 3 triangles équilatéraux unis adjacents situés dans la section droite moyenne.

— Chaque sphère ionique est tangente à 12 sphères voisines.

— Le réseau est dit "compact" parce qu'il correspond à l'empilage des atomes le plus dense possible.

NB : Calcul du Rapport $\frac{c}{a}$

Considérons le Triangle rectangle $\triangle MNP$: $PM^2 = MN^2 + PN^2$

Calculons MN $\Rightarrow MN^2 = PM^2 - PN^2$

$$PM = a$$

$$PN = \frac{2}{3} \cdot \frac{a\sqrt{3}}{2} = \frac{a\sqrt{3}}{3}$$

$$\left. \begin{array}{l} MN^2 = a^2 - \frac{a^2}{3} \\ MN^2 = \frac{2a^2}{3} \end{array} \right\}$$

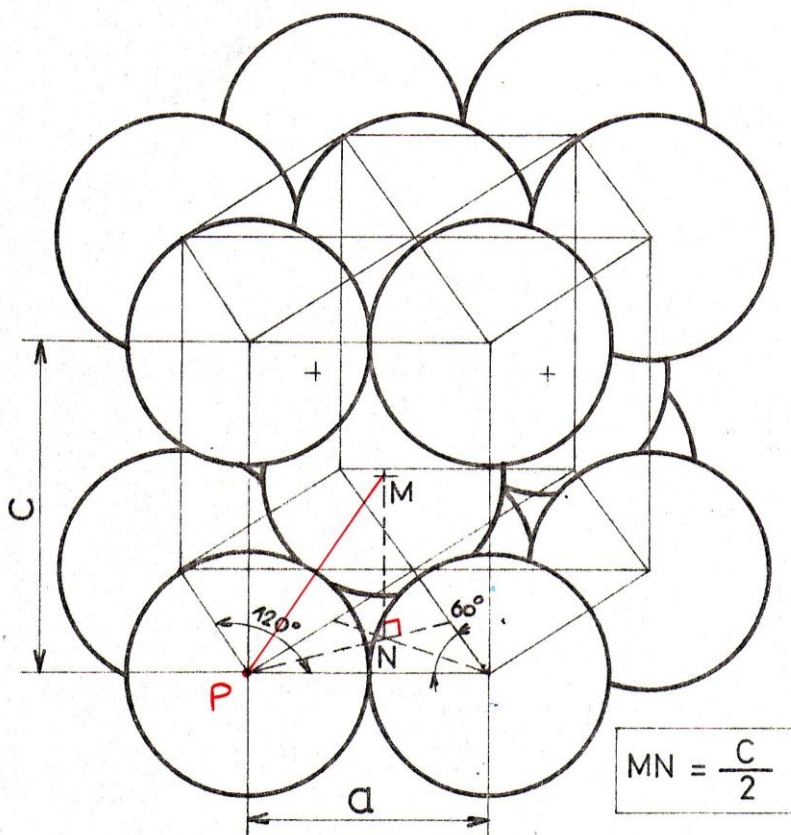
$$\Rightarrow MN = \frac{a\sqrt{2}}{\sqrt{3}}$$

$$\text{or } MN = \frac{c}{2}$$

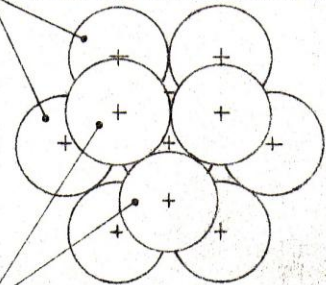
$$\Rightarrow \frac{c}{2} = \frac{a\sqrt{2}}{\sqrt{3}}$$

$$\frac{c}{a} = \frac{2\sqrt{2}}{\sqrt{3}} = 1,6330.$$

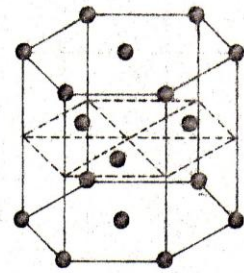
Système hexagonal compact (h-c)



arrangement des ions de la première couche.



arrangement des ions de la 2^{ème} couche, dans les interstices de la 1^{ère}.



— Valeur du rayon ionique :

$$r_{hc} = \frac{a}{2}$$

— Coordinance :

12

— Compacité :

0,74

— Le rapport de la hauteur du prisme au côté de la base vaut :

$$\frac{c}{a} = 1,633$$

— Exemples de métaux : Magnésium - Cobalt - Zinc -

Béryllium - Cadmium

→ Il s'agit de métaux difficilement déformables (plastiquement).

ETAT METALLIQUE

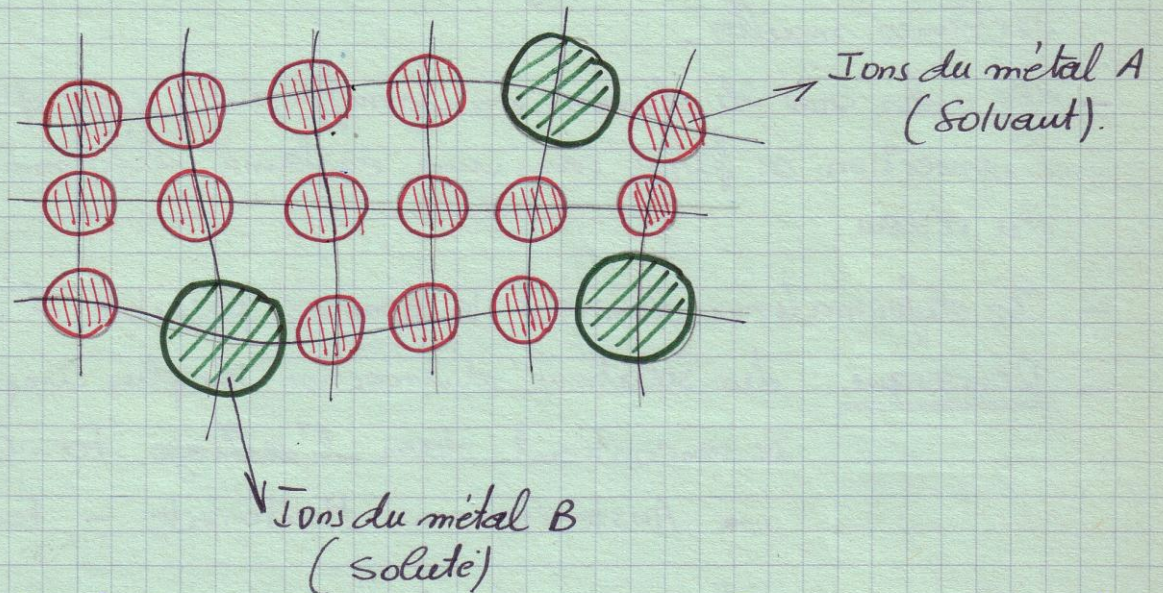
Doc : 03

4 - Structure cristalline des solutions solides

4-1 : Définition

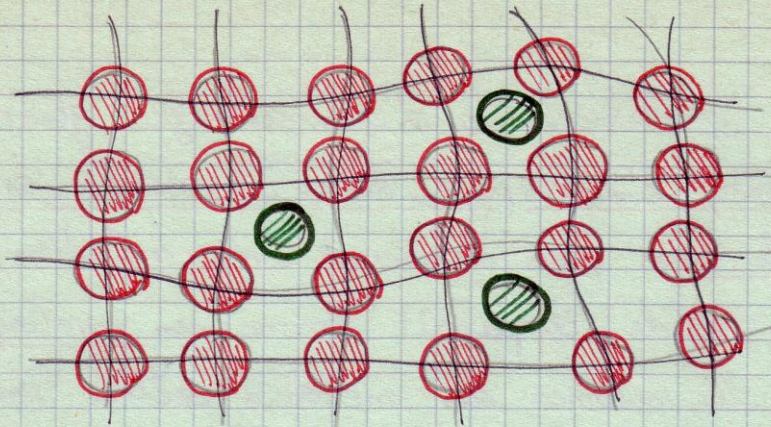
- Au cours de l'élaboration d'un alliage, généralement le métal ajouté s'incorpore dans le réseau cristallin du métal de base, en donnant une solution solide.
- Cette solution solide apparaît comme un mélange intime où les atomes des métaux alliés sont assemblés en un édifice cristallin unique.

4-2 Solutions solides de substitution



- Les ions du corps dissous (B) ont un volume sensiblement analogue aux ions du corps de base (A).
- L'étude du système cristallin montre que :
 - * la structure cristalline du solvant A est conservée.
 - * Certains ions de B se substituent à ceux de A.
 - * la répartition des ions dissous se fait au hasard dans les nœuds du système.
- Du fait de la différence des rayons ioniques le système métallique obtenu peut présenter une certaine distorsion par rapport à l'édifice initial.

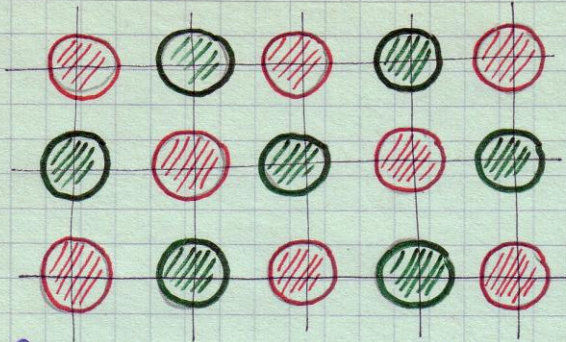
4-3 : Solutions solides d'Insertion



- Cas plutôt rare
- les ions du corps dissous sont toujours notablement plus petits que ceux du solvant.
Ils peuvent ainsi se loger dans les interstices de certaines mailles.
- les vides sont de dimensions insuffisantes pour que l'insertion se fasse sans une certaine déformation du réseau.
- Ces déformations limitent le nombre possible d'insertions
- Remarque : des solutions d'insertion les plus importantes se rencontrent dans l'alliage fer-carbone
→ Austénite - Martensite - Ferrite

⇒ Il y a modification profonde des propriétés mécaniques

4-4: Solutions solides ordonnées (Composé intermétallique)



- Ces très rares de certaines solutions de substitution
 - Mélange intime dans les rapports : $\frac{1}{1}$ $\frac{1}{2}$ $\frac{1}{3}$ ----
- Arrangement favorisé par un refroidissement lent de l'alliage à température basse.
Favorise un accroissement de la Dureté et de la résistance à la traction