

III. Les métaux

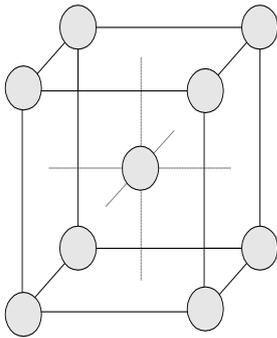
III. 1 Structure cristalline des métaux purs :

Les métaux ont une structure cristalline. La liaison métallique entre les atomes est assurée par un nuage électronique (quelques électrons "libres" par atome).

La structure cristalline est un empilement compact et régulier d'atomes ou d'ions.

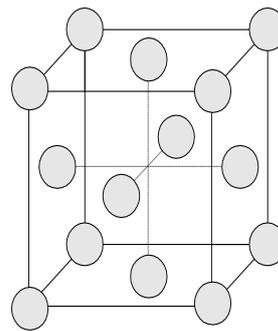
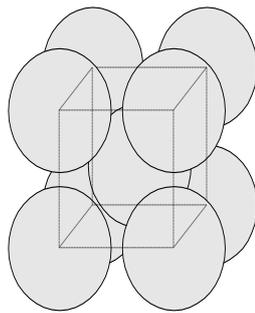
Les cristaux des métaux courants appartiennent à l'une des trois structures suivantes :

- la structure **cubique centrée CC** : les atomes sont aux sommets et au centre d'un cube pour le fer α , le chrome, le vanadium, le molybdène, le tungstène ;
- la structure **cubique à faces centrées CFC** : les atomes sont aux sommets et au centre des 6 faces d'un cube pour le fer γ , le cuivre, l'argent, l'or, le nickel ;
- la structure **hexagonale** voisine de la structure CFC pour le béryllium, le magnésium, le zinc et le titane.



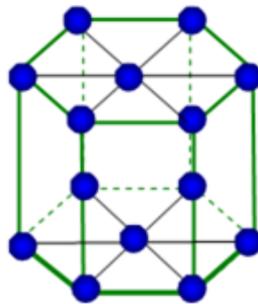
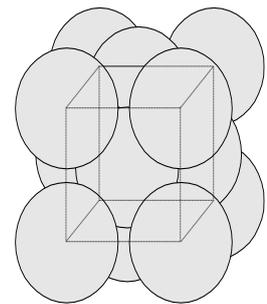
La structure cubique centrée CC.

Exemple : fer α . chrome. ...



La structure cubique à faces centrées CFC.

Exemple : fer γ , cuivre, plomb, aluminium...



La structure Hexagonal. Exemple : Ti, Zn, Mg, Cd....

Figure III-1

Représentation : Les traits continus et pointillés ne représentent pas des liaisons mais des traits de construction. Pour le modèle éclaté, la sphère figure le noyau des atomes métallique ; pour le modèle compact, la sphère figure l'atome métallique sans respecter une échelle.

Les propriétés mécaniques des métaux dépendent de leur structure cristalline.

- Les métaux qui cristallisent dans les systèmes CFC ou hexagonal se déforment facilement par glissement des plans : ces métaux sont *ductiles et malléables*.
- Les métaux qui cristallisent dans le système CC n'offre pas les mêmes possibilités de glissement : ils sont plus durs et plus cassants.

La grande importance métallurgique du fer provient, entre autres, de son aptitude à cristalliser dans deux structures différentes selon les traitements thermiques subis.

Tous les métaux à liaison métallique prononcée cristallisent suivant un des trois systèmes cfc, hc et cc. 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: Mg) sont plus difficiles à étirer sous forme de fil ou de tige que les métaux cubiques comme le cuivre et l'aluminium. Certains métaux ont la faculté de changer de système cristallin en fonction de la température. Cette particularité est appelée **polymorphisme**. C'est le cas, par exemple, du fer qui existe sous différentes structures désignées par les symboles α , γ , ou du titane α et β (Tableau 1).

Métal	Structure
Al	<i>cfc</i>
Cu	<i>cfc</i>
Fe γ	<i>cfc</i> (a)
Ni	<i>cfc</i>
Cr	<i>cc</i>
Fe α	<i>cc</i>
Mo	<i>cc</i>
Ti β	<i>cc</i>
W	<i>cc</i>
Mg	<i>hc</i>
Ti α	<i>hc</i> (b)
Zn	<i>hc</i>

(a) à 910 °C; (b) à 882 °C

Tableau 1 : Structure cristalline de quelques métaux à température ambiante, sauf indication.

III.2 Rayons métalliques :

Si nous supposons que les structures des métaux sont faites des atomes sphériques qui touchent les uns les autres, c'est assez facile, de connaître le type de structure et la taille de la cellule unitaire, pour calculer les rayons métalliques. La relation entre le paramètre, a , pour les cristaux cubiques - a et c , pour les cristaux hexagonaux - et le rayon des atomes composants, r , pour les trois structures métalliques communes est donnée ci-dessous.

Pour la structure cubique à faces centrées (fcc), les atomes sont en contact le long du diagonale d'une face de cube, de sorte que :

$$r = \frac{a_0}{2\sqrt{2}}$$

Pour la structure cubique centrée (fc) :

$$r = \frac{\sqrt{3} a_0}{4}$$

Pour la structure hexagonale :

$$r = \frac{a_0}{2}$$

III.3 Alliages métalliques en solution :

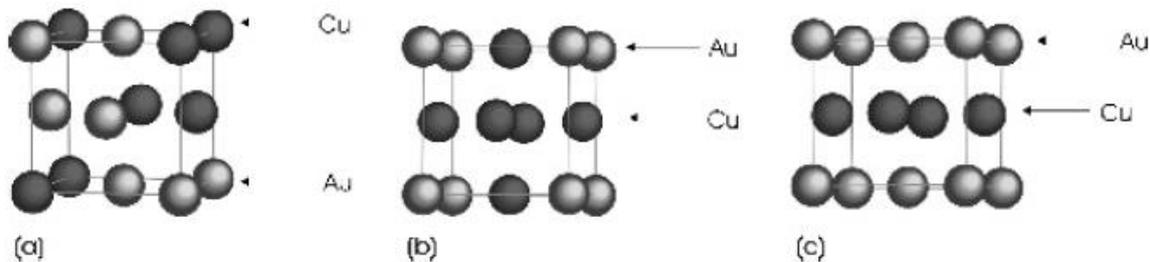
Les alliages sont importants parce qu'ils montrent souvent des propriétés supérieures à celles des éléments purs, notamment des propriétés mécaniques. Il y a un grand nombre d'alliages, dont beaucoup ont des structures inhabituels et complexes. Ici, nous mentionnerons seulement deux sortes d'alliages - des solutions solides substitutionnels et interstitielles - avec des structures largement liées aux métaux purs. Les solutions solides substitutionnelles ont une structure identique à l'un des métaux associés- la structure originale - avec les atomes de l'autre métal, où les atomes étrangers, occupent simplement des positions dans la structure normalement occupée par les atomes originaux. Les solutions solides interstitielles sont formées lorsque de très petits atomes pénètrent dans la structure originale et s'installent dans des positions interstitielles normalement inoccupées.

III-3-1 solutions solides substitutionnels :

La probabilité d'obtenir une solution solide entre deux métaux est la plus élevée lorsque: (règles de solubilité d'Hume-Rothery)

1. la structure cristalline de chaque élément du paire est identique;
2. les tailles des atomes ne diffèrent pas de plus de 15%;
3. les éléments ne diffèrent pas beaucoup en électronégativité (sinon ils formeront des composés), ce qui implique qu'ils devraient être proches les uns des autres dans le tableau périodique;
4. les éléments ont la même valence, ce qui implique qu'ils devraient se trouver dans le même groupe du tableau périodique.

Les règles prévoient, par exemple, que le nickel-cuivre (Ni-Cu) et cuivre-or (Cu-Au) devrait former des solutions solides substitutionnelles vastes.



The cubic crystal structures of (a) disordered CuAu, (b) ordered Cu₃Au and (c) ordered CuAu I

Figure III-2

III-3-2 solutions solides interstitielles :

De même que les atomes devraient être de même taille pour former des solutions solides substitutionnelles, pour former une solution solide interstitielle le rayon de l'atome étranger devrait être inférieur à environ la moitié du rayon atomique des atomes de la structure originale.

Traditionnellement, les alliages interstitiels les plus étudiés sont ceux des métaux de transition avec du carbone et de l'azote, puisque l'addition de ces atomes à la structure cristalline augmente considérablement la dureté du métal. L'acier reste le plus important alliage interstitiel traditionnel d'un point de vue mondial, constitué d'atomes de carbone distribués au hasard dans les sites interstitiels au sein de la structure (fcc) du fer pour former la phase austénite. Plus récemment, le stockage de l'hydrogène est devenu important et, aujourd'hui, les alliages interstitiels formés par l'incorporation de l'hydrogène dans les métaux sont d'une importance considérable.

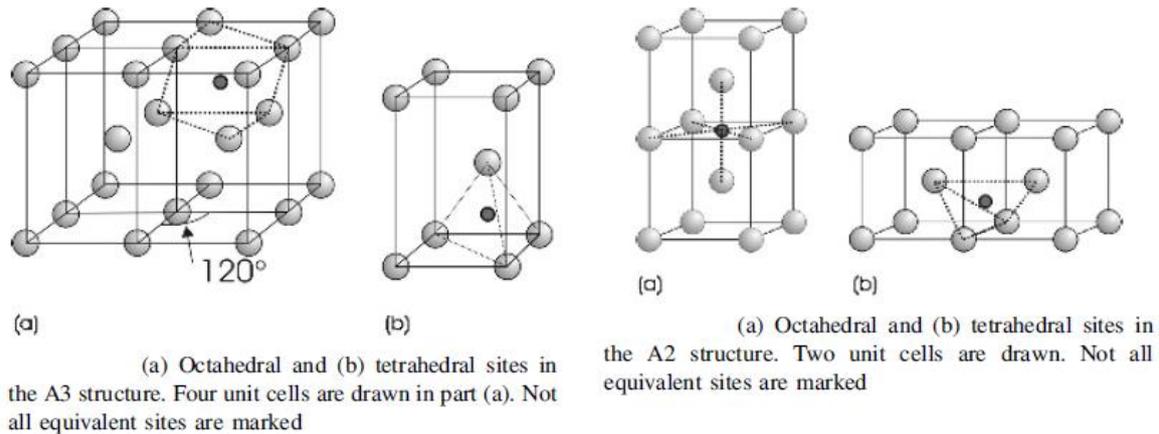


Figure III-3

III.4 Verres métalliques :

Un verre métallique est un alliage d'atomes majoritairement métalliques qui forment une phase amorphe. Ils se distinguent des alliages métalliques habituels par le fait qu'ils ne présentent pas d'ordre atomique au-delà de quelques liaisons atomiques ou plus concrètement quelques angströms. Ils possèdent néanmoins un ordre local. Donc, Les verres métalliques sont des alliages amorphes obtenus par trempe depuis la phase liquide. Ces alliages peuvent aussi être obtenus par d'autres techniques telles que : le dépôt en couche mince, ou le dépôt électrochimique. Les verres métalliques se distinguent des métaux cristallisés par l'absence de microstructures (pas de joints de grain, ni de grain), et l'absence d'ordre atomique à longue distance. Les verres métalliques sont ductiles. Ils sont caractérisés par une résistance mécanique assez exceptionnelle. Certains alliages amorphes (par exemple la composition $Fe_{60}Cr_6Mo_6B_{28}$) atteignent une limite élastique supérieure à 3500 MPa, alors qu'un acier à haute résistance a une limite élastique voisine de 2500 MPa. Ces alliages métalliques vitreux sont également plus résistants à la corrosion que les alliages métalliques cristallins, car ils ne possèdent pas de joint de grains.

La découverte des verres métalliques est assez récente (Duwez, 1960). Le potentiel d'application des alliages vitreux est grand. On connaît actuellement plusieurs applications industrielles de ces alliages, notamment comme feuilles utilisées pour effectuer des brasages dans l'industrie aéronautique. Pour obtenir une soudure ayant un point de fusion suffisamment bas pour joindre deux pièces métalliques sans les faire entrer en fusion, il est nécessaire d'introduire dans les alliages amorphes des quantités importantes de bore (~3%)

III.5 Principales propriétés des métaux :

Comme avec tous les matériaux, les propriétés apparaissent via l'interaction de la liaison et la microstructure. Les propriétés typiques des métaux tels que la bonne conductivité thermique et électrique sont les conséquences de la liaison métallique. Les électrons libres peuvent se déplacer partout dans le métal sous l'imposition d'une très faible force motrice, tension ou énergie thermique, et l'amplitude de la conductivité électrique dans un métal est liée à celle de la conductivité thermique. La relation précise s'appelle la loi de Wiedemann-Franz, donnée comme suit:

$$\frac{\text{thermal conductivity}}{\text{electrical conductivity}} = \frac{3Tk^2}{e^2}$$

Où T est la température (en K), k est la constante Boltzmann et e est la charge de l'électron.

La haute réflectivité des métaux est également due des électrons libres. Quand les photons lumineux frappent la surface d'un métal, ces électrons près de la surface de Fermi peuvent absorber les photons, puisque beaucoup des états vides d'énergies se trouvent à proximité. Cependant, les électrons peuvent tout aussi facilement revenir aux niveaux inférieurs occupés initialement, et les photons sont réémis.

Lorsque deux métaux différents sont unis, les électrons passeront de l'énergie de Fermi la plus haute vers la plus basse. Cela donne lieu à des effets thermoélectriques et au fonctionnement des thermocouples.

L'Alliage avec d'autres métaux ou non-métaux avec des petits pourcentages ne changeront pas radicalement ces propriétés physiques mais les atomes étrangers gênent généralement le transport d'électrons. Les alliages tendent donc à avoir une faible conductivité électrique plus faible par rapport à celle des métaux purs. Si une nouvelle phase se forme, la surface de Fermi et la densité des états à la surface de Fermi vont changer et la conductivité électrique va changer brusquement. Par exemple, l'incorporation de l'hydrogène dans le magnésium produira initialement un alliage interstitiel avec des propriétés métalliques, mais une conductivité électronique inférieure. L'augmentation du pourcentage de l'hydrogène conduit à la formation de l'hydruure MgH_2 , qui est transparent et non métallique.

La ductilité est une propriété mécanique importante pour un métal, ce qui signifie qu'un métal peut être déformé facilement sans casser et peut retenir la forme déformée indéfiniment. Les métaux purs en particulier sont doux et facilement attirés en des fils ou martelés en des feuilles. Cette propriété peut être attribuée aux structures cristallines des métaux, qui sont constitués d'empilement d'atomes sphériques. Celles-ci peuvent facilement rouler les uns sur les autres

pour produire la déformation. Il n'y a pas des liaisons fortes localisées afin d'être brisées, et donc la liaison métallique n'empêche pas la déformation. Les calculs montrent qu'un métal pur se déforme plus facilement que les liaisons métalliques devraient permettre. Le conflit est résolu par la reconnaissance du rôle que les défauts jouent dans les cristaux. Les dislocations permettent la déformation sans la nécessité de casser de nombreux liens métalliques à tout moment.

Nous associons à la déformation facile d'un métal, le fait que les métaux peuvent facilement être durcis. L'explication réside à nouveau avec les dislocations présentes dans les cristaux. Le piégeage de ces dislocations, appelé épinglage, empêche la déformation facile, et par conséquent le métal devient plus dur. Cela peut se produire par l'introduction des impuretés et la formation des alliages substitutionnels ou interstitiels, un fait utilisé empiriquement depuis l'âge de bronze. Cependant, un durcissement plus efficace se produit si des précipités se forment dans le cristal. Ceux-ci, provoqués par l'alliage et le recuit, produisent des métaux très durs. Les aciers, déjà bien plus durs que le fer pur, sont encore durcis par l'incorporation du carbone ou d'azote suivi d'un traitement thermique qui provoque ces éléments à se combiner et forment des précipités dans les cristaux originaux. L'alliage devient plus dur car le mouvement des dislocations devient complètement impossible, en conséquence, le métal devient cassant. Ainsi la fonte, qui contient de nombreux précipités de cémentite et graphite, est très fragile, tout comme les métaux qui contiennent de grandes quantités d'hydrogène.