

2 Notions de cristallographie

2.1 Introduction

Les métaux et alliages industriels sont des corps constitués de divers constituants caractérisant leurs propriétés et leurs caractéristiques. L'identification de ses constituants, est avérée indispensable pour déterminer les relations entre le comportement et la tenue en services des matériaux. On appelle microstructure des matériaux l'ensemble des paramètres microstructuraux décrivant les constituants des matériaux à l'échelle microscopique. (Figure 1)

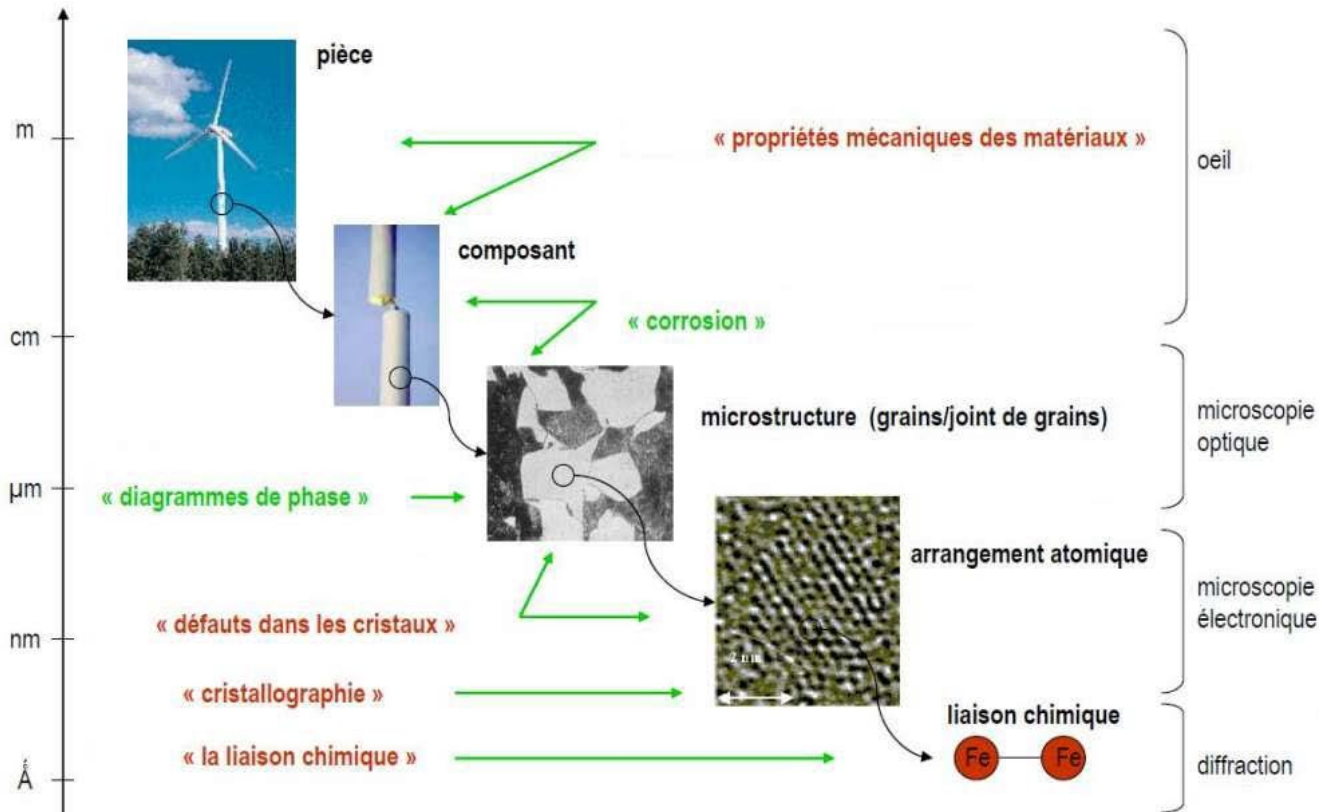


Figure 1 : Différentes échelles de l'étude de la matière

La science des matériaux a pour objet d'étudier les relations entre les structures et les propriétés des matériaux. Elle fait le lien entre le niveau atomique et l'échelle macroscopique.

Les solides sont formés d'atomes liés entre eux par des forces.

La structure d'un matériau correspond généralement à la façon dont s'organisent ses éléments constitutifs.

2.2 Etats physiques de la matière

La matière peut exister sous trois états physiques distincts : *solide*, *liquide* ou *gaz*. Ces différents états physiques proviennent essentiellement des effets de la température sur la microstructure.

- À **température élevée**, la matière est à l'état gazeux, état caractérisé par une distance importante entre atomes ou molécules disposés alors en désordre.
- À **température plus basse**, les forces d'attraction interatomiques ou intermoléculaires peuvent provoquer le passage à l'état liquide. Les atomes ou molécules sont en désordre, mais à courte distance.
- À **température encore plus basse**, les forces d'attraction interatomiques devenant

encore plus prépondérantes, la matière peut passer à l'état solide cristallisé. Les atomes sont alors ordonnés et à courte distance.

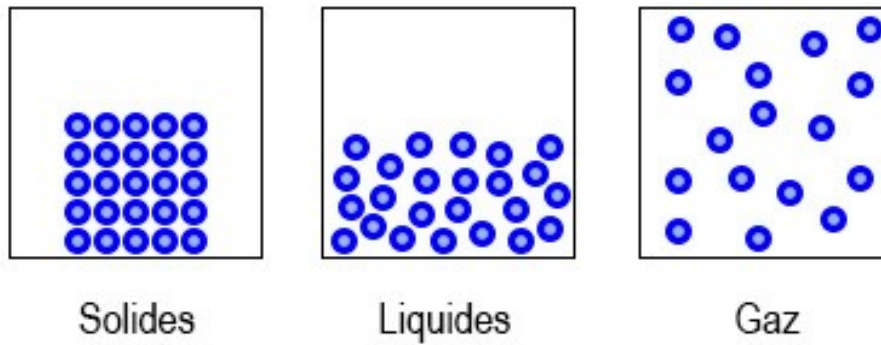


Figure 2 : Etats physiques de la matière

- **Mobilité atomique, Agitation thermique**

La **température** de la matière mesure essentiellement le degré d'agitation et de désordre des atomes qui la constituent.

- Lorsqu'elle s'élève, les atomes vibrent autour de leur position moyenne, occupant ainsi un espace plus important (d'où la dilatation thermique) et se déplaçant plus facilement (d'où la **diffusion** et la mobilité atomique).
- Si l'abaissement de température s'effectue rapidement par rapport à la mobilité atomique, les atomes n'ont pas la possibilité de s'ordonner avant que l'arrêt de la diffusion ne les immobilise. Le liquide se fige alors en **solide amorphe ou vitreux**, les atomes y sont en **désordre à courte distance**. La viscosité d'un solide vitreux varie continûment avec la température depuis celle d'un liquide jusqu'à celle d'un solide.

- **Diffusion**

A l'échelle atomique, la diffusion consiste simplement en une migration (transfert) graduelle d'atomes passant d'un point du réseau à un autre. En réalité, les atomes d'un matériau solide sont constamment en mouvement et changent rapidement de position.

2.3 Description de l'état cristallin

2.3.1 Cristallographie

La **cristallographie** décrit l'architecture des cristaux, c'est-à-dire la répartition des atomes dans l'espace et les lois géométriques qui en fixent la position. Les solides cristallins sont donc caractérisés par un ensemble d'atomes arrangés périodiquement suivant les trois directions de l'espace dans un ordre strict qui définit la structure cristalline.

Exemple

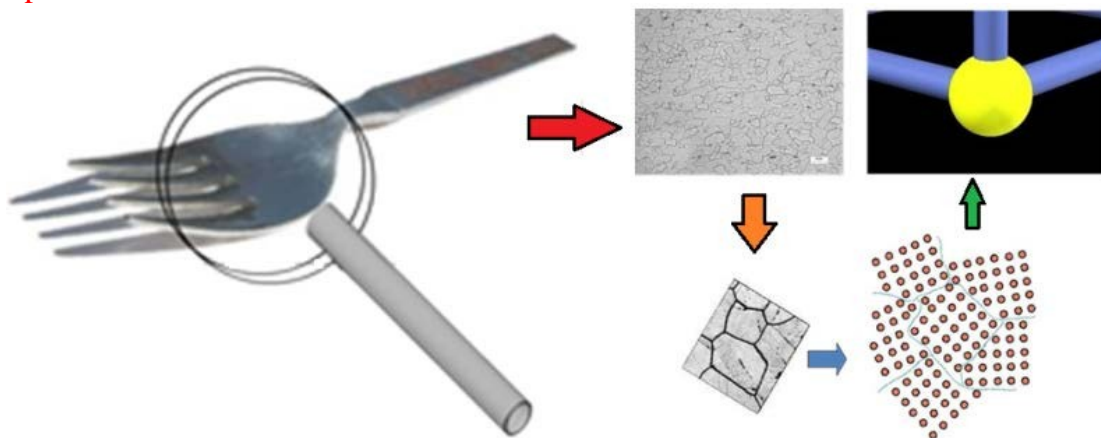


Figure 3 : Observation microscopique

Si on regarde de très près une fourchette en acier, on voit qu'elle est composée de grains microscopiques, des monocristaux, collés les uns aux autres.

Ces grains sont constitués d'un empilement régulier de briques. On représente cet empilement par un ensemble ordonné de petits cubes, les atomes se retrouvant par exemple aux sommets de ces cubes.

Un **solide cristallin** est un solide à structure régulière et périodique, formé d'un empilement ordonné d'un grand nombre d'atomes, de molécules ou d'ions.

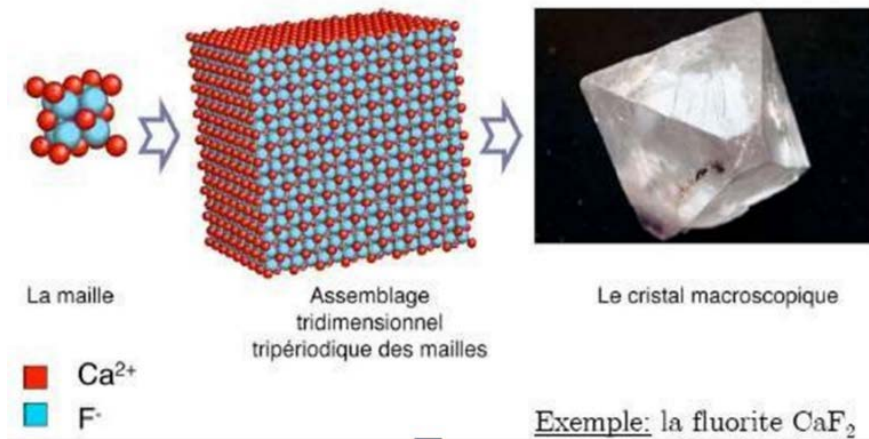


Figure 4 : Solide cristallin

Il peut être défini à partir de deux données : le **réseau cristallin** et le **motif atomique**

LA STRUCTURE CRISTALLINE = RESEAU+MOTIF

- Un **réseau spatial** est constitué par un ensemble de points (noeuds), de dimension infinie, obtenu par translation dans l'espace de trois vecteurs non coplanaires, a , b et c , qui déterminent les directions et les distances entre les noeuds du réseau. Dans le cristal, chaque noeud du réseau possède un environnement identique pour une direction donnée.
- Le **motif** constitue l'élément de base dont la répétition suivant le réseau spatial engendre le cristal. Le motif peut être un atome ou un groupe d'atomes ayant une orientation et une géométrie bien déterminées.
- La **maille** contient le motif d'atomes qui se répète. Les mailles ont donc un volume de forme géométrique simple (cube, parallélépipède) dont la répétition dans l'espace engendre le réseau et le cristal. Les valeurs absolues a , b et c des trois vecteurs qui forment les arêtes de la maille sont appelées les paramètres de la maille.

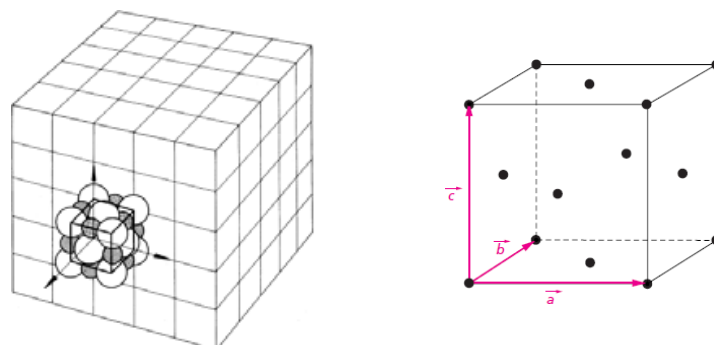


Figure 5 : Exemple d'un réseau spatial - Exemple d'une maille

2.4 Systèmes cristallins et réseaux de Bravais

On dénombre **sept systèmes cristallins** qui diffèrent entre eux par leurs éléments de symétrie. Ce sont les systèmes triclinique, monoclinique, orthorhombique, hexagonal, rhomboédrique, quadratique et cubique. Les distances **a, b, c** et les angles **α, β, γ** sont appelés les *paramètres de la maille*.

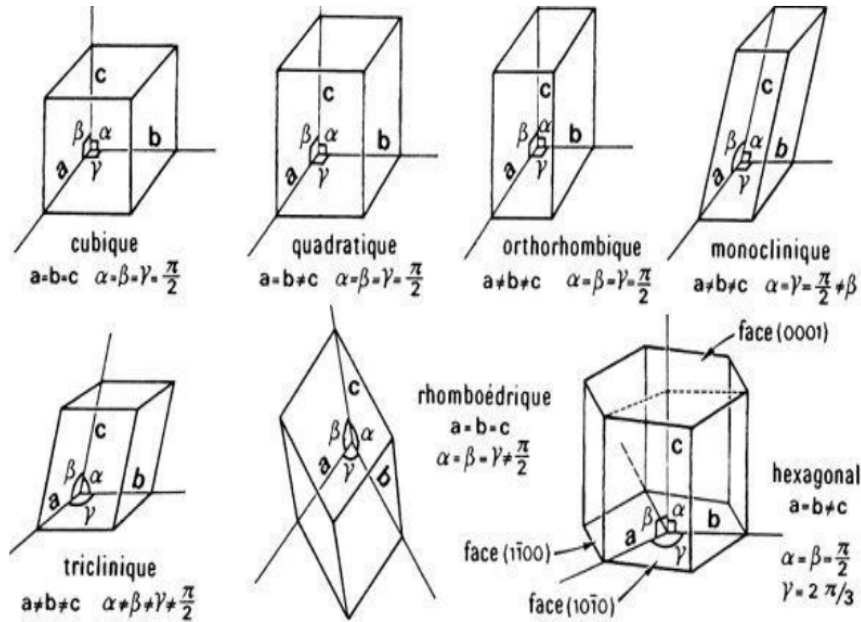


Figure 6. Les 7 systèmes cristallins

Pour obtenir les quatorze réseaux de Bravais, il est nécessaire de tenir compte des variantes centrées et à faces centrées qui s'ajoutent à certains systèmes cristallins primitifs.

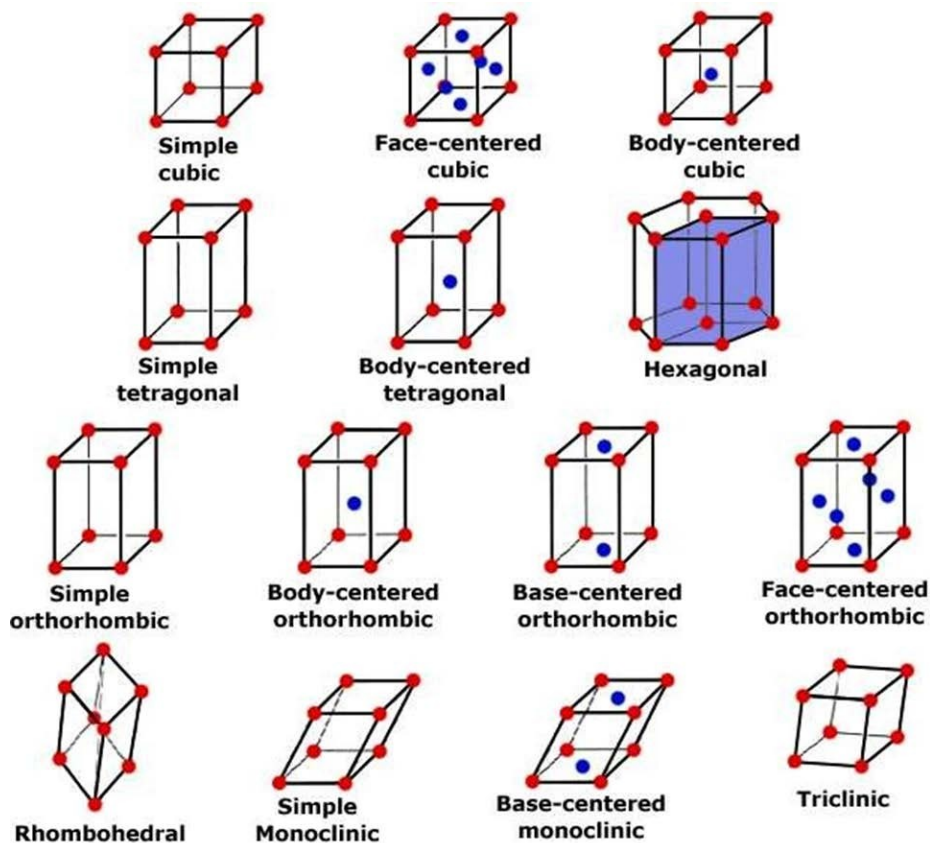


Figure 7 : Les 14 réseaux de Bravais

Il existe de nombreuses structures cristallines. Mais, pour les matériaux métalliques, seules trois structures sont rencontrées :

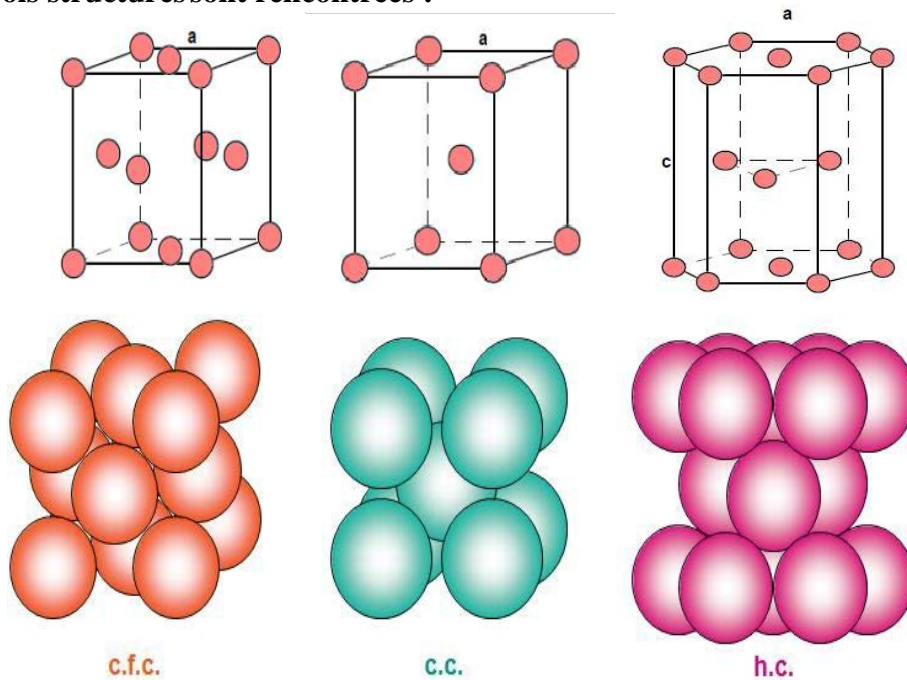


Figure 8 : Les mailles les plus courantes.

- La structure cubique à faces centrées (CFC) :** La maille est un cube sur lequel on trouve un atome sur chaque face. On peut définir une nouvelle maille à partir d'un centre de face où cet atome devient un des angles du cube. On dispose de quatre atomes propres par maille :

 - 8 atomes comptant pour un demi-atome à chaque sommet
 - 6 atomes comptant pour un demi-atome à chaque face.

Les sphères atomiques sont en contact sur la diagonale de chaque face.
Exemple : Fer α , aluminium, nickel, cuivre, argent, or, plomb.
La particularité de ces métaux c'est qu'ils sont ductiles et malléables.
- La structure cubique centrée (CC) :** La maille est un cube à l'intérieur duquel se trouve un atome supplémentaire. En utilisant des mailles adjacentes et à partir de l'atome central, on peut définir une nouvelle maille, où cet atome devient un angle du cube. On dispose de deux atomes propres par maille :

 - Un atome central,
 - Huit atomes comptant pour un huitième atome à chaque sommet

Le taux de remplissage de l'espace de la maille est de 68% (taux de compacité).
Exemple : Fer α , chrome, tungstène, molybdène, vanadium. Ce sont des métaux particulièrement résistants.
- La structure hexagonale compacte (HC) :** La maille est un prisme droit à base hexagonale est déterminée par les paramètres a , la côte de l'hexagone de base, et c la hauteur du prisme. On trouve un atome à chaque sommet, un atome au centre de chaque base, et trois atomes à mi-hauteur, selon la figure (7). Comme pour les systèmes précédents, on peut définir une nouvelle maille à partir d'un atome qui n'est pas sur un des sommets. On dispose de 6 atomes propres par maille :

 - 12 atomes comptant pour un sixième d'atome à chaque sommet.
 - 2 atomes comptant pour un demi-atome au centre de chaque base ;
 - 3 atomes centraux

Exemple : Titane, Zirconium, Cadmium, Zinc, Hafnium.

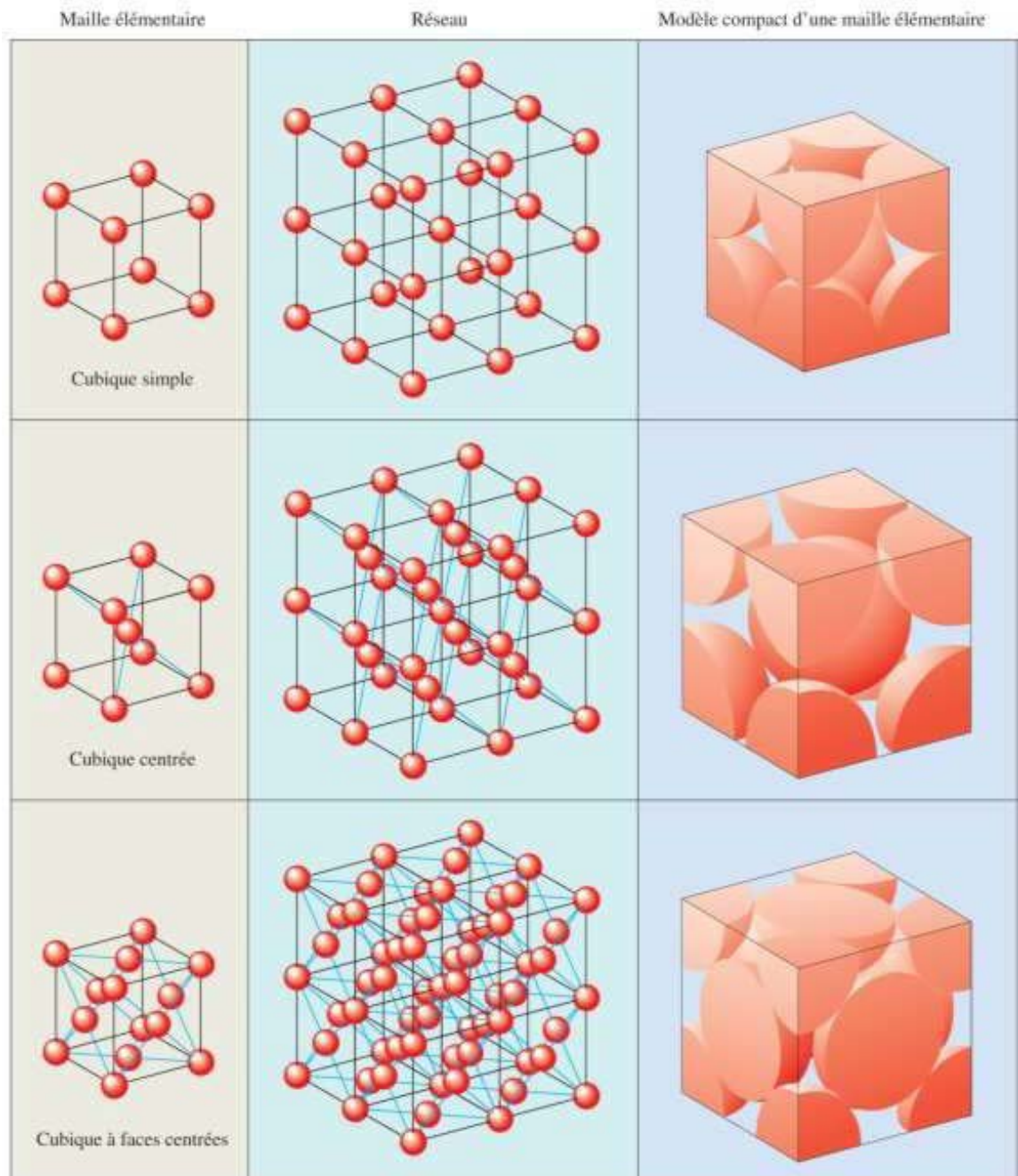


Figure 9 : Maille élémentaire – Réseau – Modèle compact d'une maille élémentaire

- Sur un sommet, l'atome (ou molécule ou ion) appartient à 8 mailles et compte pour 1/8
 - Sur une arête, l'atome (ou molécule ou ion) appartient à 4 mailles et compte pour 1/4
 - Sur une face, l'atome (ou molécule ou ion) appartient à 2 mailles et compte pour 1/2
 - À l'intérieur de la maille, l'atome (ou molécule ou ion) appartient à 1 maille et compte pour 1
- **Compacité** : la **compacité** (ou taux de remplissage) d'une maille est le rapport entre le volume des atomes d'une maille sur le volume de la maille. C'est le taux réel d'occupation de l'espace. La compacité a pour expression :

$$\text{Compacité} = \frac{\text{Volume des atomes}}{\text{Volume de la maille}} \quad 14$$

2.5 Solides cristallins et amorphes

Tous les matériaux qui nous entourent sont formés d'atomes et de molécules. Dans l'état désordonné, les atomes ou molécules constituant la matière sont disposés de façon essentiellement aléatoire. Les gaz et les liquides appartiennent naturellement à cette catégorie, mais aussi les solides amorphes, tels que les verres. A l'opposé, dans l'état ordonné ou cristallin, les éléments constitutifs (atomes, ions ou molécules) sont répartis de façon régulière suivant les trois directions de l'espace.

2.5.1 Corps cristallin

Un **cristal** est un ensemble d'atomes (ou de molécules) disposés de manière périodique dans les trois directions et présentant aussi bien un ordre à courte distance

2.5.2 Corps amorphe

Dans un solide amorphe ou vitreux, les atomes sont disposés aléatoirement et proches les uns des autres. Cependant, un certain degré d'ordre à courte distance.

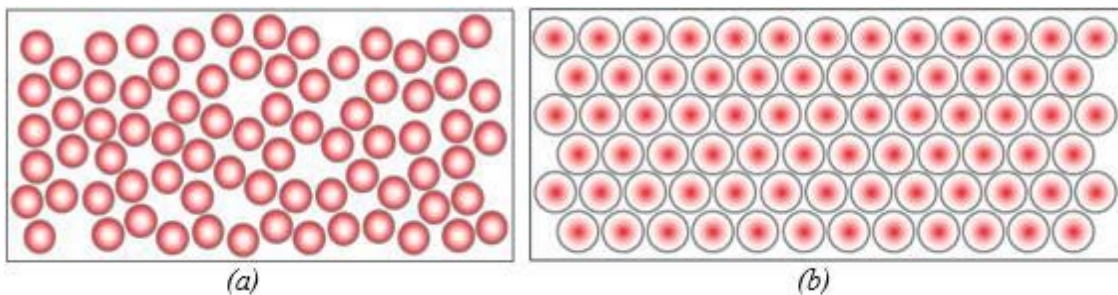


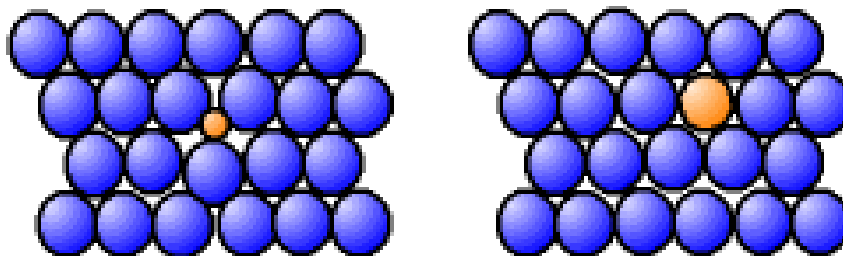
Figure 10 : Illustration de la structure : (a) amorphe ou semi-cristalline (b) cristalline

2.6 Solutions solides

2.6.1 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

Figure 11 : Différents types de solution solide

- Les **solutions solides d'insertion** peuvent être formées d'atomes hétéros interstitiels (impuretés) donc de défauts ponctuels ou d'éléments d'addition.

Une solution solide est formée lorsque des atomes de soluté suffisamment petits arrivent à se placer entre les atomes de solvant. En pratique, le diamètre des atomes de soluté ne dépasse pas 60% du diamètre des atomes de solvant.

Si les atomes de l'élément d'alliage B ont un rayon atomique suffisamment faible, ils vont pouvoir s'introduire dans les interstices de la structure de A, donnant ainsi naissance à une **solution solide d'insertion** (ou **solution solide interstitielle**). Le solvant est représenté par des atomes de fer et le soluté par des atomes de carbone (atomes en insertion entre les atomes de fer)

Les atomes pouvant être placés en insertion sont : H, O, N, C, B.

- Les **solutions solides de substitution** peuvent être formées d'atomes de remplacement non voulu (atome étranger de substitution) donc de défauts ponctuels ou d'atomes de remplacement voulu = alliage.

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. Si même taille (taille peu différente) et même système.

Ex : Ag (diamètre 288.3 pm) et Au (diamètre 287.8 pm) ont le même système CFC et ont des diamètres voisins.

2.6.2 Solutions solides ordonnées et désordonnées

Deux types de solutions solides de substitution peuvent être distingués :

- 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.

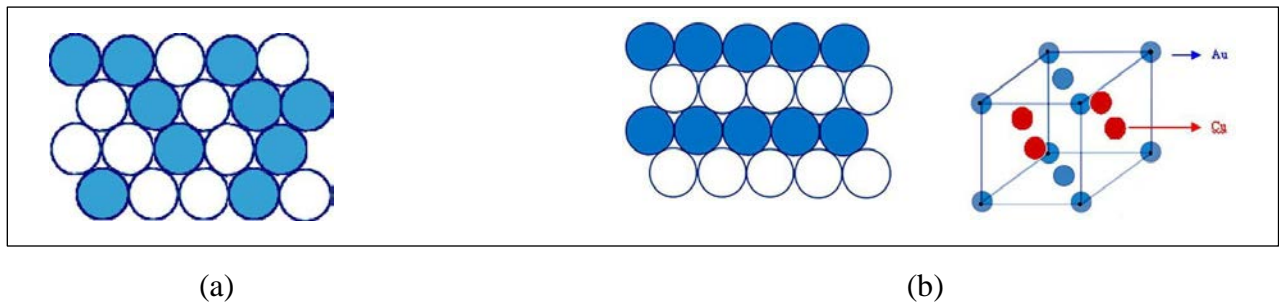


Figure 11 : Représentation schématique d'une solution solide : (a) désordonnée- (b) ordonnée