
Chap. 2

Structures cristallines des métaux

Contenu :

- ☞ *Liaisons interatomique*
- ☞ *Structures cristallines*
- ☞ *Géométrie descriptives des structures*

Plan du cours

Objectif général

Décrire les notions de bases des paramètres microstructuraux des métaux.

Objectifs spécifiques

- Présenter les caractéristiques des liaisons atomiques.
- Définir les termes : structure cristalline, système cristallin, maille, nœud.
- Déterminer dans une maille élémentaire, les indices d'une direction ou d'un plan cristallographique.
- Calculer la compacité et la masse volumique d'une structure maille élémentaires.
- Décrire les caractéristiques essentielles des défauts cristallins.

Déroulement

Le chapitre sera abordé durant 4 séances de 1h:30min réparties comme suit :

- ☞ Première séance : Notions de grains, de phase et liaisons interatomiques
- ☞ Deuxième séance : Réseau de Bravais, directions et des plans cristallins
- ☞ Quatrième séance : Repérage des plans cristallins et exercices d'application

Prérequis

- Notions élémentaires de mathématiques.
- Notions élémentaires de chimie.

Critères d'évaluation

L'étudiant doit être capable de :

- Représenter les mailles élémentaires des structures CC, CFC, HC.
- Déterminer les indices des directions et des plans cristallographiques.
- Dessiner ces plans et directions.

Sommaire

Introduction	32
1. Architectures atomiques	33
1.1. Structure de l'atome	33
1.2. Type de liaisons atomiques	33
1.2.1. Liaison ionique	33
1.2.2. Liaison covalente	34
1.2.3. Liaison métallique	34
1.3. Force de répulsion:	35
2. Les solides cristallins	36
2.1. Mise en évidence	36
2.2. Description d'un cristal	36
2.3. Grandeurs attachées à un cristal	37
2.4. Sites cristallographiques	37
2.5. Repérage des directions et des plans	38
2.5.1. Directions réticulaires	38
2.5.2. Plans réticulaires	39
2.6. Systèmes et réseaux cristallins	40
3. Empilement dans les cristaux métalliques	40
3.1. Structure cubique centrée CC	40
3.2. Structure cubique à faces centrées CFC	41
3.3. Structure hexagonale compacte HC	42
3.4. Empilement spatiaux	42
3.5. Notions de défauts cristallins	43
3.5.1. Les défauts ponctuels	43
3.5.2. Grains et Phases : Les défauts surfaciques	44
4. Applications 1 (Extraits des examens et DS)	45
5. Applications 1 (Extraits des Travaux dirigés)	48

Introduction

Les métaux et alliage industriels sont des corps constitués de divers constituants caractérisant ses propriétés et ses caractéristiques. L'identification de ses constituants, est avéré 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. Un matériau est formé d'une multitude de petits volumes polyédriques appelés grains et phases dont la taille varie en général de $1\mu\text{m}$ à plusieurs mm .

En conséquence, La maîtrise de nouveaux matériaux a été à l'origine de révolutions dans l'histoire des technologies. Les âges de la préhistoire sont d'ailleurs définis par les matériaux employés, âge de la pierre, âge du bronze, du fer. Aujourd'hui, le nombre de matériaux ou en tout cas le nombre de références est considérable et en constante révolution. En effet, la science des matériaux permet de concevoir de nouveaux matériaux adéquats pour chaque nouvelle application. On pourra distinguer deux grandes catégories de matériaux :

(1) les matériaux de structure, faisant l'objet de ce cours et qu'on utilise essentiellement pour leurs capacités à soutenir des sollicitations mécaniques et thermiques.

(2) les matériaux fonctionnels, qu'on utilise pour leurs propriétés physiques, telles que conductivité ou semi-conductivité électrique, magnétisme, propriétés optiques ...

En effet, on caractérise les propriétés d'un matériau à une échelle donnée. A cette échelle le matériau est considéré comme homogène et continu. Si l'échelle à laquelle est caractérisée la propriété est comparable à l'échelle de l'hétérogénéité interne du matériau. Les résultats seront, en conséquences, dispersés.

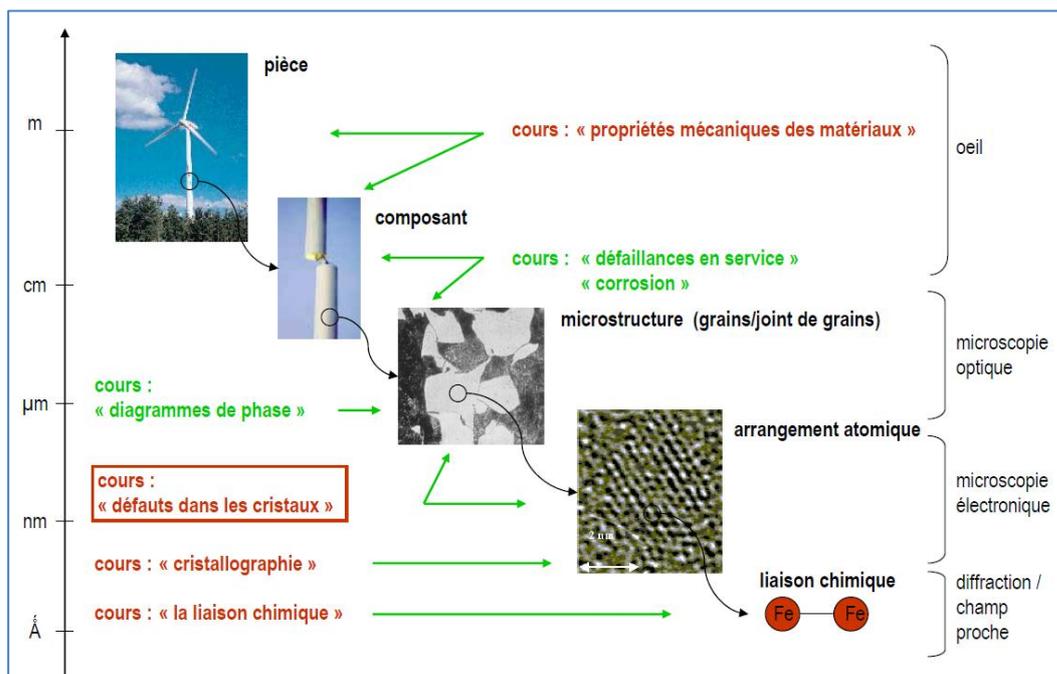


Fig. 2.1. Différente échelles de l'étude de la matière

6. Architectures atomiques

1.4. Structure de l'atome

L'atome est constitué d'un noyau autour du quel gravitent des électrons. Le noyau est formé de:

- ❖ Proton: masse $M_P = 1,67 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$; charge positif $e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$
- ❖ Neutron: masse $m_N = M_P$ charge nulle
- ❖ Electron masse $m_e = M_P/1840 = 0,91 \cdot 10^{-30} \text{ kg}$, charge négative égal à $(-e)$
- ❖ La grandeur d'un atome à quelques Angstrom de (1 à 4\AA) : $1\text{\AA} = 10^{-10} \text{ m}$

1.5. Type de liaisons atomiques

Elles sont directement reliées à la couche périphérique, elles sont de trois types

- ❖ Liaison ionique
- ❖ Liaison covalente
- ❖ Liaison métallique

1.2.4. Liaison ionique

Cette liaison se caractérise par l'échange d'électrons entre deux atomes. Cette liaison est forte suite à la saturation de la couche extérieure des atomes qui deviennent des ions. Cette liaison concerne essentiellement les éléments qui ont peu d'électrons sur leur couche externe (soient les colonnes 1 et 2 du tableau périodique) et les éléments qui ont des couches externes presque saturées (colonnes 16 et 17 du même périodique). Par exemple, le sodium Na, présente une structure électronique comme suit : $1s^2, 2s^2, 2p^6, 3s^1$. Il devient donc un ion Na^+ . Par ailleurs, le Chlore Cl, présente une structure électronique comme suit $1s^2, 2s^2, 2p^6, 3s^2, 3p^5$, il devient donc un ion Cl^- , on obtient ainsi le composé stable **NaCl**. Cette liaison est forte car elle stabilise fortement la structure électronique des atomes en saturant leur couche électronique externe.

La réaction $\text{K}^+ + \text{Cl}^-$ à titre d'exemple, donne **KCl** libère ainsi une énergie de 374 kJ/mole.

Exemple-typique d'une liaison ionique : $\text{LiF} \longrightarrow \text{Li}^+ + \text{F}^-$

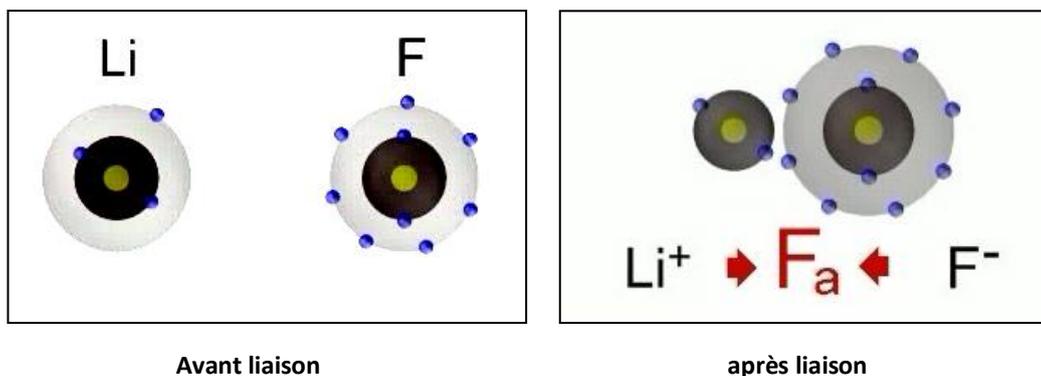


Fig. 2.2. Mise en évidence d'une liaison ionique (cas de fluorure de lithium)

Les matériaux constitués à l'aide des liaisons ioniques sont caractérisés par: une mauvaise conductivité thermique, transparent, fragile, haut point de fusion.

1.2.5. Liaison covalente

Cette liaison se caractérise par la mise en commun d'électrons afin de saturer les couches électroniques externes de chacun des atomes mis en liaison. Cette liaison permet par exemple d'expliquer l'association de deux atomes d'hydrogène pour former la molécule de dihydrogène. La liaison covalente est également une liaison forte puisque elle permet de saturer la couche électronique externe des atomes.

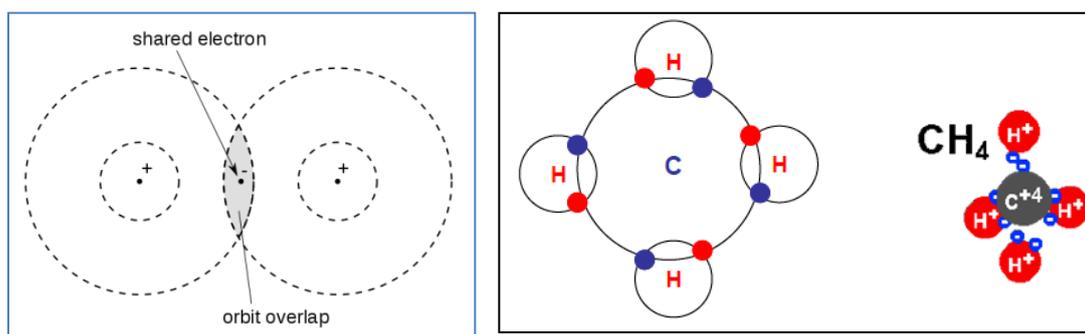


Fig.2.3. Schéma de liaisons covalentes : Cas de dihydrogène H_2 et le CH_4

1.2.6. Liaison métallique

Cette liaison se caractérise aussi par la mise en commun d'électrons entre plusieurs atomes afin de saturer les couches électroniques externes. A la différence de la liaison covalente, la liaison métallique est délocalisée, c'est-à-dire que chaque atome peut être considéré comme un ion baignant dans un gaz d'électron. Elle se produit entre les métaux elle est accompagnée par la formation des électrons libres. Elle est forte et non directionnelle.

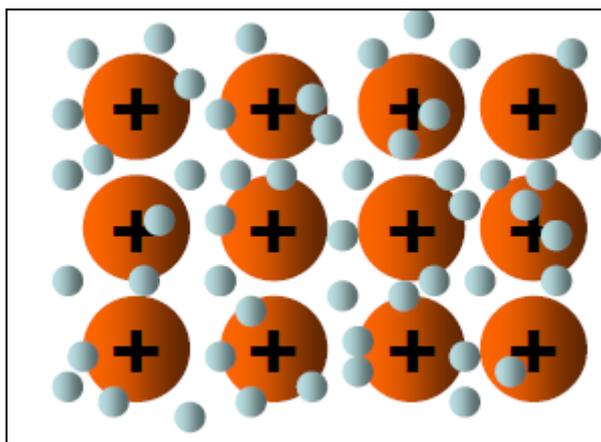


Fig. 2.4 : Mise en évidence d'une liaison ionique (cas de fluorure de Sodium)

Le tableau ci-dessous donne des exemples typiques pour des liaisons interatomiques de certaines substances chimiques. Ici on s'intéresse aux liaisons les plus communément connues.

Liaison	Matériaux	caractéristiques
Ionique	Na Cl, Al ₂ O ₃	Mauvaise conductivité électrique, fragile, transparente, haute point de fusion
Covalente	Si, diamant	Mauvaise conductivité électrique, très grande dureté, haut point de fusion
métallique	Na, Al, Cu, Fe, W	Bonne conductivité électrique et thermique, facilement déformable, opaque

1.6. Force de répulsion:

Les forces de répulsion entre les atomes ont pour origine l'interaction de leurs couche électronique: lorsque deux atomes sont très proches l'une de l'autre, les couches électroniques des deux atomes sont plus proche l'une de l'autre, que du noyau de l'autre, ou encore que des deux noyaux.

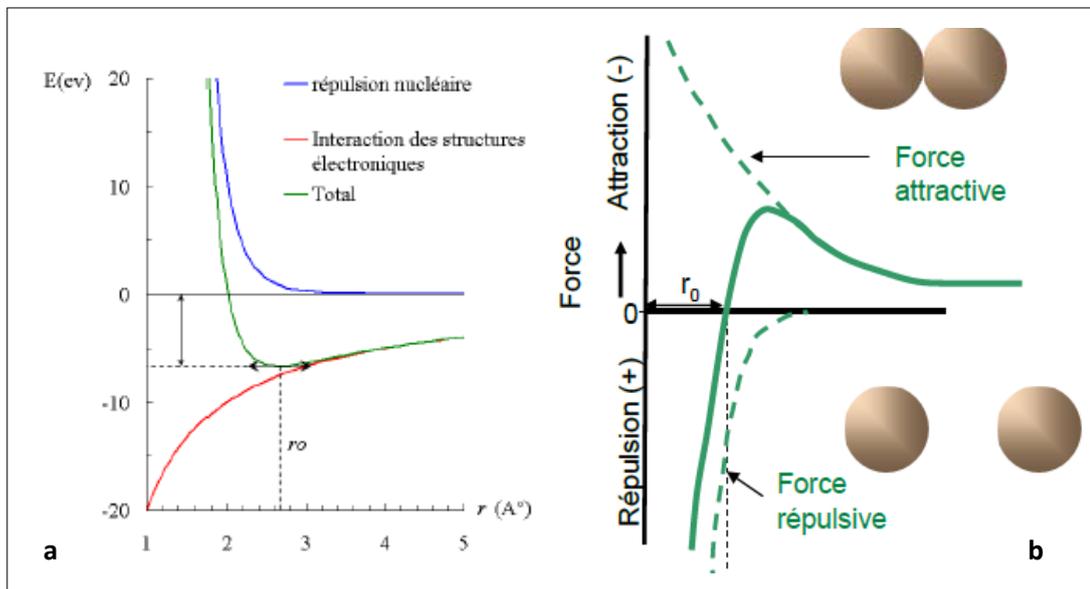


Fig. 2.5. Illustration, (a) potentiel d'interaction découlant des forces nucléaires répulsives et des interactions attractives. (b) Force associée,

❖ **Force de liaison:** la force de liaison F entre deux atomes peut être représentée (approximativement) par la relation suivante

$$E = -\frac{A}{r^m} + \frac{B}{r^n}$$

A , B , a , b , sont des constantes dont les valeurs dépendent de la nature de la liaison et des atomes associés.

- ✓ r : est la distance entre les deux couches des atomes.
- ✓ r_0 : est la distance d'équilibre entre les atomes. Considérons que le système est à la température du zéro absolu afin qu'aucune énergie d'agitation thermique ne soit présente. Si la distance interatomique r diminue, les charges électriques de même signe créent un potentiel électrostatique de répulsion U_r entre les deux atomes, alors que les charges de signe opposé créent un potentiel électrostatique d'attraction U_a .

- ✓ L'énergie électrostatique de répulsion $U_r(\mathbf{r})$ est définie par l'expression $U_r = B/r^m$
- ✓ L'énergie d'attraction appelée $U_a(\mathbf{r})$ est définie par la loi de coulomb $U_a = A/r$

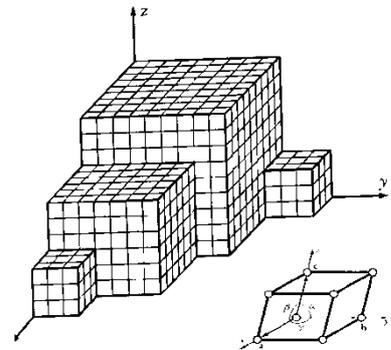
Avec B : constante positive dépend de nombre de proton et d'électron en présence et m une constante de l'ordre de 6 à 9 pour les liaisons métalliques, et de 9 à 11 pour les liaisons covalentes et ioniques

7. Les solides cristallins

2.7. Mise en évidence

La majorité des phases solides de substances pures sont cristallines. L'état cristallin est l'état solide normal des corps purs (stabilité thermodynamique, énergie interne minimale). Il est caractérisé par un ordre structural parfait, tridimensionnel. Sa caractéristique essentielle est d'être périodique :

- un milieu cristallin est constitué d'un ensemble d'atomes. Ces derniers, organisés suivant un ordre défini, engendré par la répétition périodique dans l'espace des atomes constituants ou de groupements d'atomes (de même nature ou de natures différentes) suivant les trois directions de l'espace, non coplanaires. Ce groupement d'atomes permettra, par des translations seulement, d'engendrer la structure cristalline complète. Ceci, est appelé le motif du cristal. Quant aux extrémités des vecteurs définissant les translations dans tout l'espace, elles constituent un ensemble de points, appelés les nœuds du réseau cristallin.



2.8. Description d'un cristal

A chaque système cristallin correspond une répartition spatiale des atomes, ions, molécules aux sommets d'un réseau tridimensionnel.

a. Définition

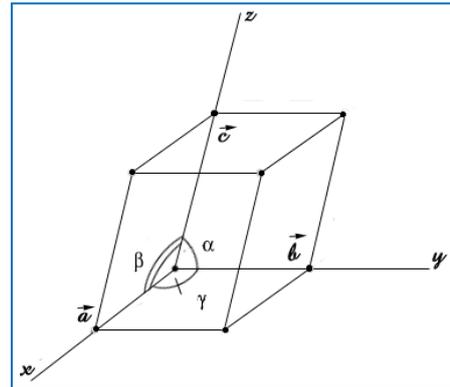
i. **Maille élémentaire**: C'est la portion d'espace de volume minimal, tel que par translation de vecteur repéré par ses composants (m, n, p) selon les trois axes entiers. Les abscisses (m, n, p) sont trois (03) entiers et $(\mathbf{a}, \mathbf{b}, \mathbf{c})$ sont les 3 vecteur de base de la maille). La maille assure le paramétrage dans l'espace et donne le cristal. Il existe une infinité de mailles élémentaires de volume

ii. **Réseau** : Ensemble infini de points matériels (appelés nœuds) obtenu par translation de trois vecteurs non coplanaires. Les différentes entités sont repérées sur des nœuds définis dans la maille. Le réseau est l'arrangement spatial de ces nœuds.

iii. **Motif** : Le motif est constitué par la plus petite entité matérielle discernable périodiquement répétitive dans la structure. Pour un cristal, le motif est une particule (atome, ion ou molécule). Groupe d'atomes dont la répétition engendre le cristal.

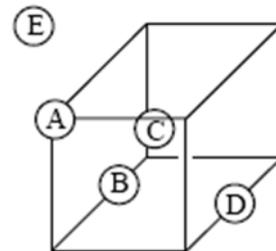
2.9. Grandeurs attachées à un cristal

a) Paramètres cristallographiques : D'après les définitions précédentes, trois vecteurs (donc six paramètres) sont nécessaires pour caractériser un réseau : a, b, c, les modules des vecteurs translations élémentaires sont appelés les paramètres linéaires. Angles respectifs des directions des vecteurs, sont appelés les paramètres angulaires.



b) Nombre de motifs Z par maille : Nombre d'atomes par maille, on le note Z.

- L'atome E n'appartient pas à la maille il compte pour 0.
- L'atome A au sommet du cube, A appartient à 8 mailles
- L'atome B au centre d'une face il appartient à 2 mailles
- L'atome C au centre du cube il appartient à 1 maille
- L'atome D sur une arête du cube il appartient à 4 mailles



c) Coordinence :

La coordinence est le nombre de plus proches entités voisines.

d) Masse volumique :

e) Masse volumique ρ :

$$\rho = \frac{\text{Masse des entités de la maille}}{\text{Le volume de la maille}}$$

$$\rho = \frac{Z \cdot M_a}{N \cdot V}$$

Z : Nombre d'atomes par maille, **Ma** : masse Molaire, **N** : nombre d'Avogadro.

V : Volume totale de la maille.

2.10. Sites cristallographiques

Tout réseau cristallin, constitué de sphères identiques de rayon R comporte nécessairement des portions d'espaces inoccupées, puisque $C < 1$. Celles-ci portent le nom de sites cristallographiques. Ces sites peuvent être occupés par des espèces différentes. On distingue 3 types de sites.

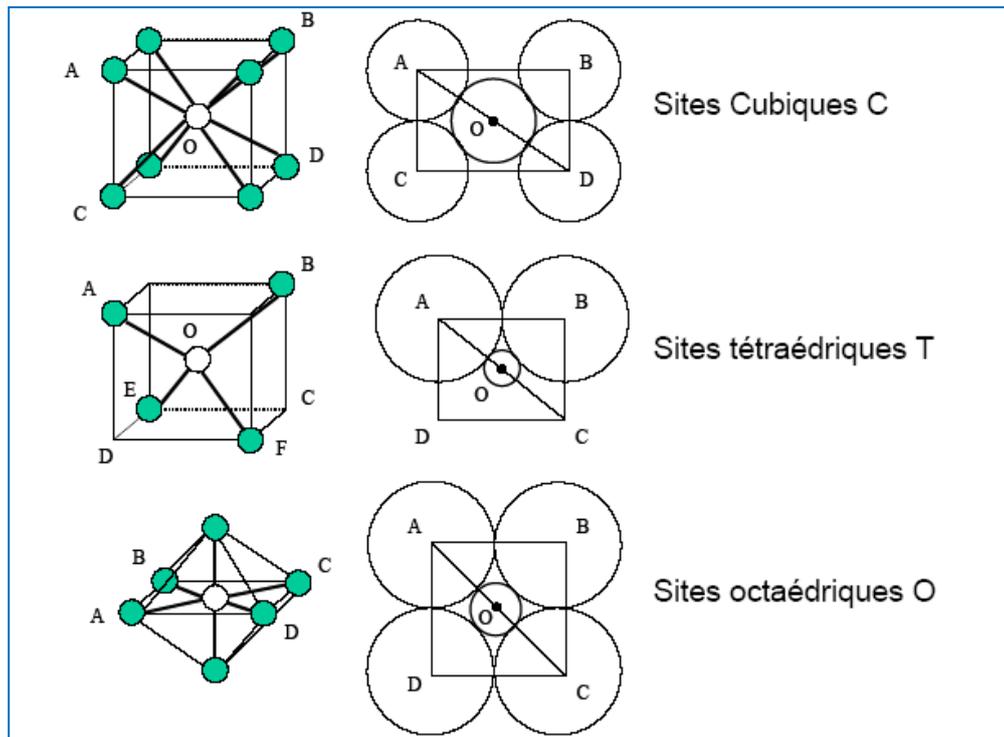


Fig. 2.6. : Les sites cristallographiques de base

2.11. Repérage des directions et des plans

Le système d'axe de repérage des directions et des plans dans un réseau cristallin est celui qui correspond aux trois vecteurs principaux de la maille. La maille élémentaire est définie par trois vecteurs $\vec{a}, \vec{b}, \vec{c}$

Plan réticulaire: plan passant par 3 nœuds du réseau au moins ou cristallographique.

Rangée réticulaire: droite passant par 2 nœuds du réseau au moins.

2.5.3. Directions réticulaires

Une direction est désignée par trois indices $[u\ v\ w]$ qui signifie une droite partant de l'origine et passant par l'atome de coordonnées u, v et w . Une famille de direction est désignée par $\langle u\ v\ w \rangle$. Avec u, v, w des entiers.

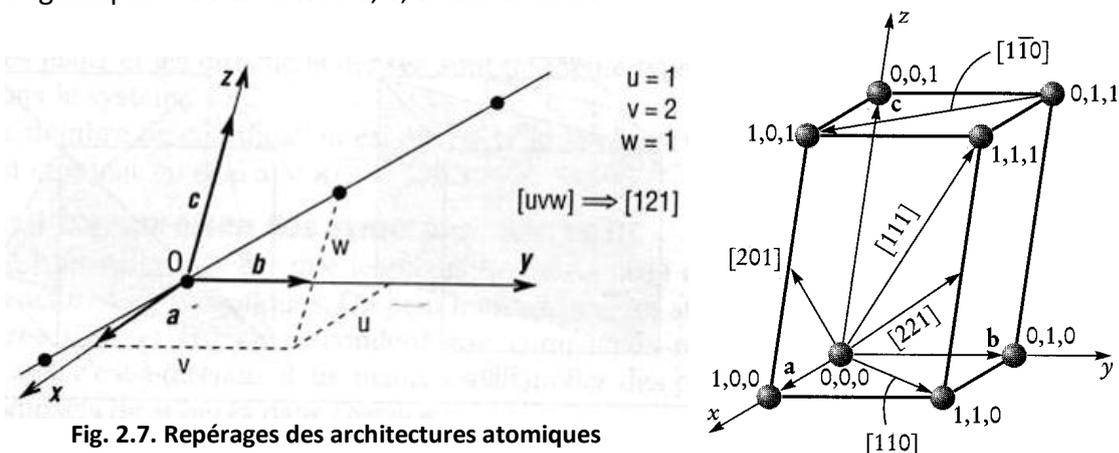


Fig. 2.7. Repérages des architectures atomiques

Méthode pour désigner une direction

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

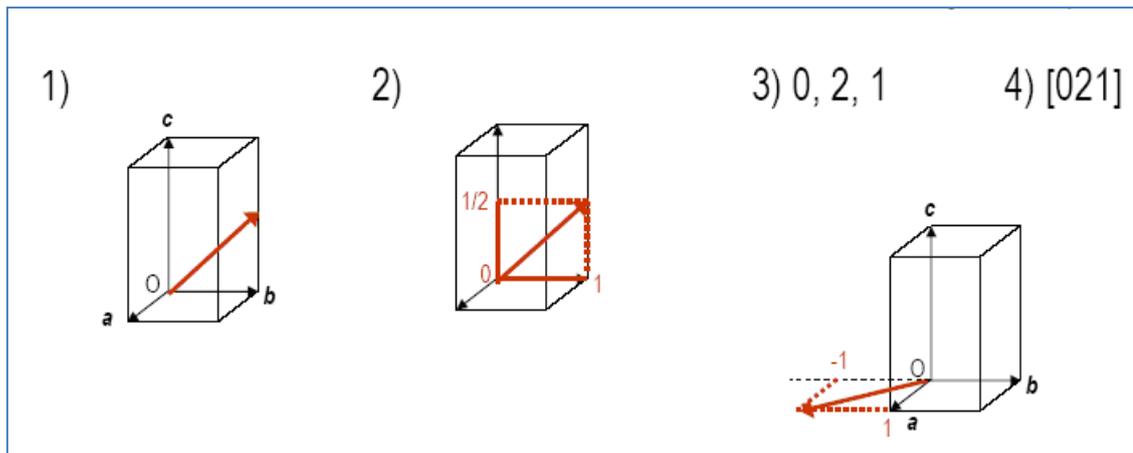


Fig. 2.8. Démarche de repérage des directions cristallines

2.5.4. Plans réticulaires

Un plan réticulaire est désigné par trois indices de Miller $(h\ k\ l)$. En effet un plan qui coupe les axes Ox , Oy , Oz en M , N , P est défini comme les plus petits entiers proportionnels à $1/m$, $1/n$ et $1/p$.

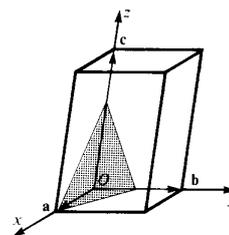
Méthode pour désigner un plan :

- Dessiner un plan dans la maille élémentaire qui ne passe pas par l'origine ;
- Exprimer les coordonnées des points d'intersection du plan avec les trois axes dans la base $(\vec{a}, \vec{b}, \vec{c})$
- Prendre l'inverse de ces coordonnées ;
- Ramener ces coordonnées à des valeurs entières, les plus petites possibles ;
- Noter le plan de la façon suivante (hkl) (Indices de Miller du plan)
- Distance interréticulaire: est la distance entre les plans de la famille (hkl)

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

Exemple :

- 1, 1/2, 2/3
- 1, 2, 3/2
- 2/2, 4/2, 3/2
- 2, 4, 3



2.12. Systèmes et réseaux cristallins

Il existe sept systèmes cristallins différents. En plaçant dans les mailles primitives des nœuds supplémentaires (au centre des bases, au centre de chacune des faces ou au centre de la maille) on obtient quatorze réseaux cristallins distincts (réseaux de Bravais).

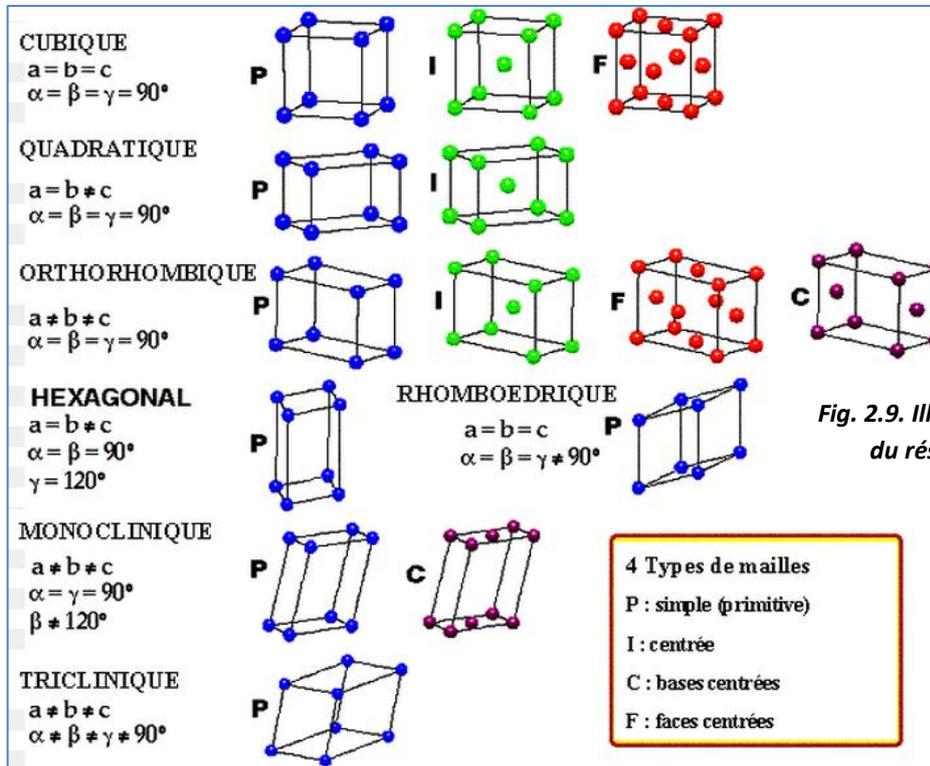


Fig. 2.9. Illustration graphique du réseau de Bravais

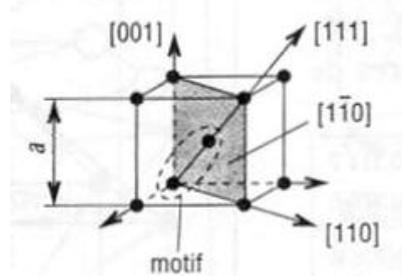
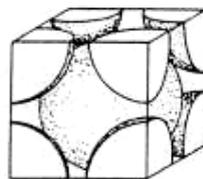
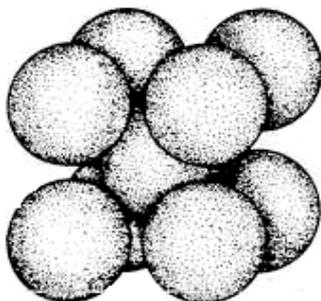
8. Empilement dans les cristaux métalliques

Parmi les systèmes énumérés dans le tableau précédent nous allons étudier le système cubique (CC, CFC) et le système hexagonal (HC). Un métal peut présenter plusieurs structures cristallines selon l'intervalle de température considéré, on dit qu'il présente un polymorphisme cristallin.

Exemple : Le Fer $:-273^\circ\text{C} \xrightarrow{CC} 912^\circ\text{C} \xrightarrow{CFC} 1394^\circ\text{C} \xrightarrow{CC} 1538^\circ\text{C}$

3.6. Structure cubique centrée CC

Définie par une maille élémentaire de 2 ions (un au centre et 8 aux sommets du cube mais appartenant chacun à 8 mailles).



- Paramètre de la maille : a

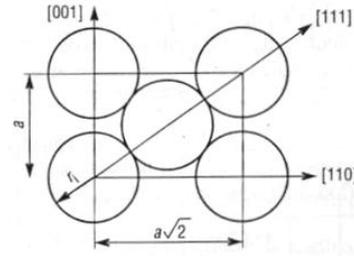
- Distance inter atomique : $d_a = a \frac{\sqrt{3}}{2}$

- Rayon atomique : $R_a = a \frac{\sqrt{3}}{4}$

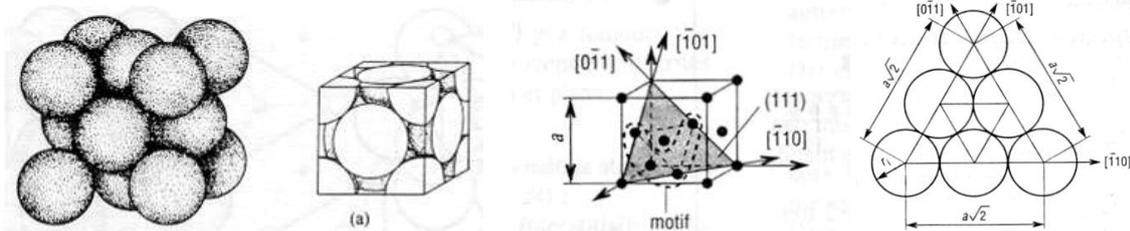
- Indice de coordination : $I_c := 8$
(C'est le nombre d'atome voisin d'un atome donné).

- Nombre d'atomes par maille : $1 + \frac{8}{8} = 2$

- Compacité : $C = \frac{\text{Volume des atomes de la maille}}{\text{Volume de la maille}} = \frac{2 \cdot \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot (R_a)^3}{a^3} = 0.678$



3.7. Structure cubique à faces centrées CFC



Définie par un motif élémentaire de 4 ions (6 sur les faces appartenant chacun à 2 mailles et 8 aux sommets du cube mais appartenant chacun à 8 mailles).

- Paramètre de la maille : a

- Distance inter atomique : $d_a = a \frac{\sqrt{2}}{2}$

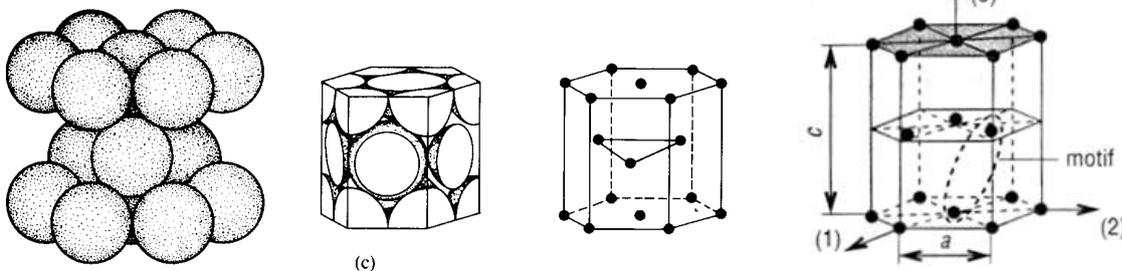
- Rayon atomique : $R_a = a \frac{\sqrt{2}}{4}$

- Indice de coordination : $I_c := 12$ (c'est le nombre d'atome voisin d'un atome donné).

- Nombre d'atomes par maille : $\frac{8}{8} + \frac{6}{2} = 4$

-Compacité : $C = \frac{\text{Volume des atomes dans la maille}}{\text{Volume de la maille}} = \frac{4 \cdot \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot (r_a)^3}{a^3} = 0.74$

3.8. Structure hexagonale compacte HC



Définie par un motif élémentaire de 2 ions. La maille représentative contient 6 ions (3 à l'intérieur et 2 sur les bases, communs chacun à 2 mailles, et 12 sur les sommets, communs chacun à 6 mailles).

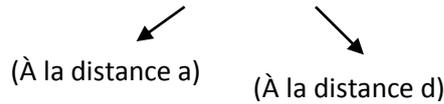
- Paramètre de la maille : a,c

- Distance inter atomique : $da^2 = \frac{a^2}{3} + \frac{c^2}{4}$
- Rayon atomique : $r_a = a/2$

$$\Rightarrow \frac{c}{a} = 1,63$$

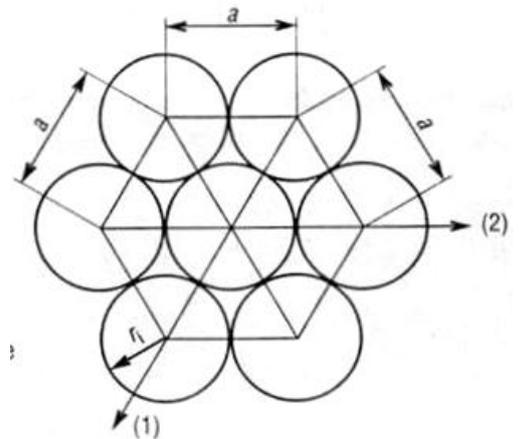
L'empilement est dit idéal lorsque $d=a$

- Indice de coordination : $ic := 12 = 6 + 6$



- Nombre d'atomes par maille : $3 + \frac{12}{6} + \frac{2}{2} = 6$

- Compacité : $C = \frac{\text{Volume des atomes de la maille}}{\text{Volume de la maille}} = \frac{6 \cdot \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot (Ra)^3}{3a \cdot \frac{a\sqrt{3}}{2} \cdot C} = 0.74$



3.9. Empilement spatiaux

On considère les atomes comme des sphères dures indéformables de rayon R. Dans un plan A, l'empilement le plus compact possible est obtenu lorsque les sphères sont tangentes. Leurs centres forment des triangles équilatéraux de côté : $a=2R$. Une sphère a alors 6 voisins.

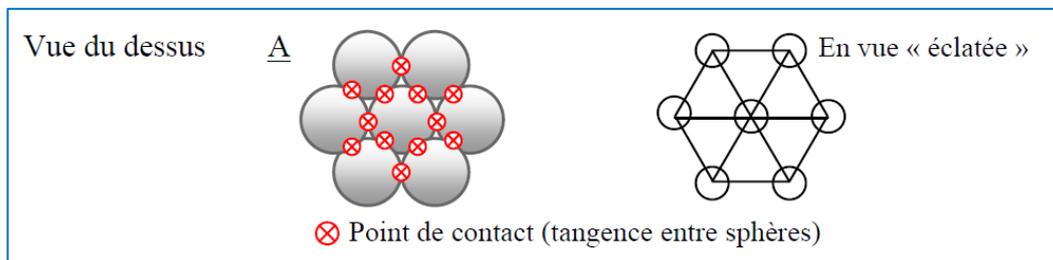


Fig. 2.10. Descriptif des empilements en modèle sphère formé de 6

Au-dessus du plan A, une seule solution possible, plan B, dans lequel chaque sphère B est au contact de 3 sphères du plan A. Les sphères B sont localisées à la verticale des barycentres des triangles équilatéraux qui décrivent le plan A.

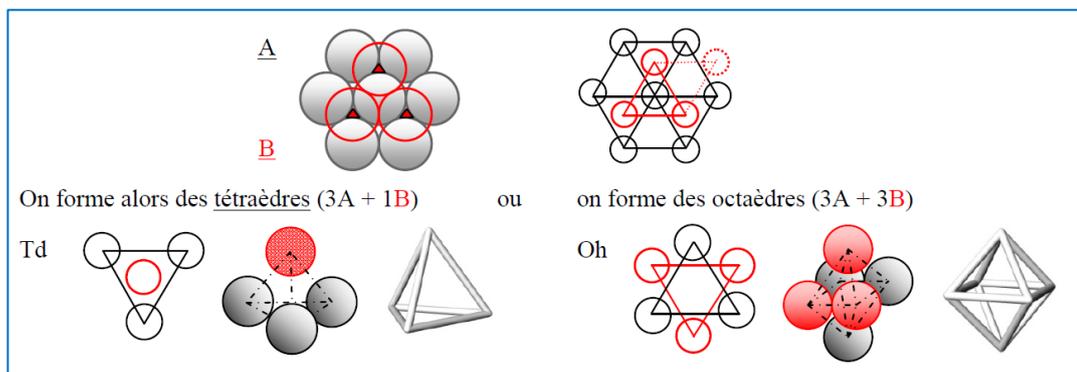


Fig. 2.11. Descriptif des empilements en modèle sphère d'un plan B sur un plan A

3.10. Notions de défauts cristallins

3.5.3. Les défauts ponctuels

Ce sont des défauts sans dimension qui possèdent une taille de l'ordre de la distance interatomique. Il existe trois types de défauts dits ponctuels : les lacunes, les interstitiels et les atomes en substitution, comme cela est décrit sur la figure ci-dessous. La présence de défauts ponctuels entraîne une distorsion locale du réseau cristallin ce qui engendre un champ de contraintes dans un volume du cristal soit supérieur à celui du défaut lui-même.

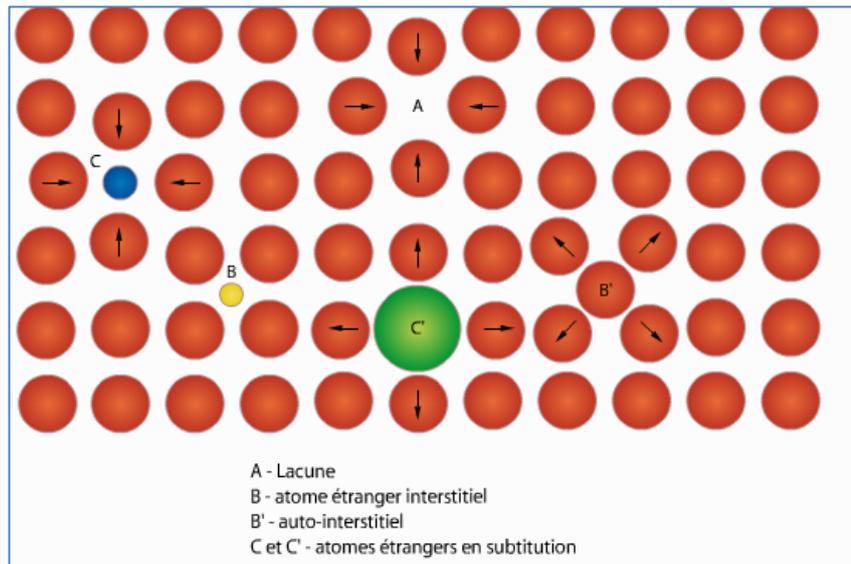


Fig. 2.13. Types de défauts ponctuels dans les cristaux : (a) lacune, (b) atome étranger interstitiel, (b') auto-interstitiel et (c) atome étranger en substitution

Les Lacunes

Ce défaut correspond à un site atomique inoccupé dans la structure. 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.

Les Interstitiels

Ce sont des atomes qui s'insèrent dans les espaces vides du réseau cristallin. Si l'atome en insertion est lui-même un atome du réseau cristallin, on parle d'auto-interstitiel. Les défauts interstitiels jouent un grand rôle dans la constitution des alliages (Voir chapitre V).

Concentration des Défauts Ponctuels

Le nombre N_f de défauts ponctuels est fonction de la température, il est donné par une relation de type Arrhenius : $N_f = N \cdot \exp\left(-\frac{Q_f}{kT}\right)$

Où N est le nombre de nœuds du réseau, Q_f est l'énergie de formation d'un défaut (de l'ordre de 1eV pour défaut lacunaire et 7eV pour un interstitiel). Le paramètre k est la constante de Boltzmann ($k = 1,381 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}$).

Atomes en Substitution

C'est un atome étranger qui se place à un nœud du réseau cristallin. Ce type de défauts joue également un rôle important dans la constitution des alliages.

3.5.4. Grains et Phases : Les défauts surfaciques

Sauf élaboration particulière, la quasi-totalité des métaux cristallins est constituée d'un agglomérat de phases, ou grains accolés avec des orientations différentes. La taille des grains allant de quelques microns à quelques millimètres suivant leurs conditions d'élaboration. Si ces cristaux sont de nature identique, leur surface d'accolement est appelée joint de grains. Si les cristaux sont de structures métallurgiques différentes, leur surface d'accolement est appelée joint de phases.

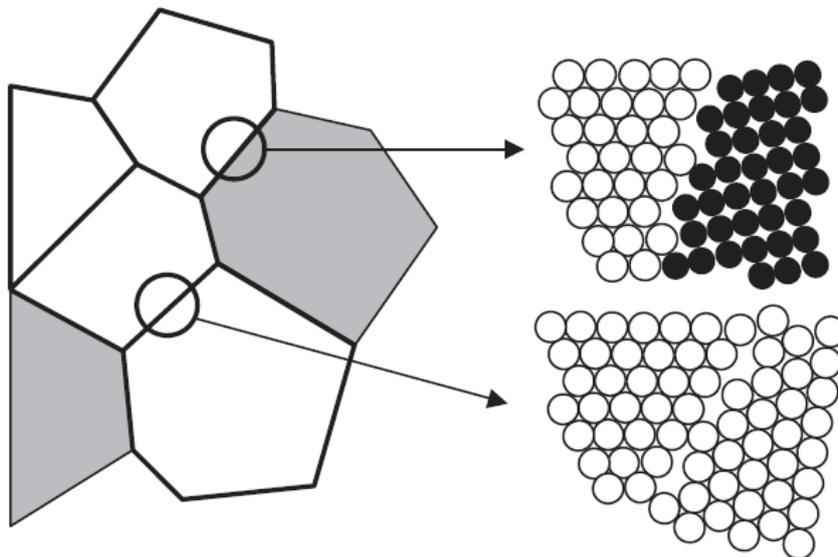


Fig. 2.14. Polycristal, et schématisation à deux dimensions d'un joint de grains et d'un joint de

9. Applications 1 (Extraits des examens et DS)

Exercice 1 : Comportement en traction des matériaux

Le comportement en traction des alliages industriels est un outil d'aide à la décision des processus de mise en forme et au choix de ses paramètres opératoires. On dispose dans ce premier exercice des données expérimentales issues d'un essai de traction unidirectionnelle exercé sur un alliage industriel dual-phases DP600 destiné pour l'industrie de carrosserie automobiles en vue d'extraire ses caractéristiques mécaniques.

1. Décrire l'intérêt industriel de comprendre et de modéliser le comportement élasto-plastique des alliages industriels.

.....

.....

.....

.....

.....

2. Tracer la courbe conventionnelle sur la **figure 1** ci-dessous décrivant l'évolution des contraintes en fonction des déformations.

$\epsilon_c(\%)$	0	0.6	02.8	4	6	8	11	13	16	18	21.5	25	28
$\sigma_c[\text{MPa}]$	0	461	520	566	630	670	715	738	765	784	801	757	565

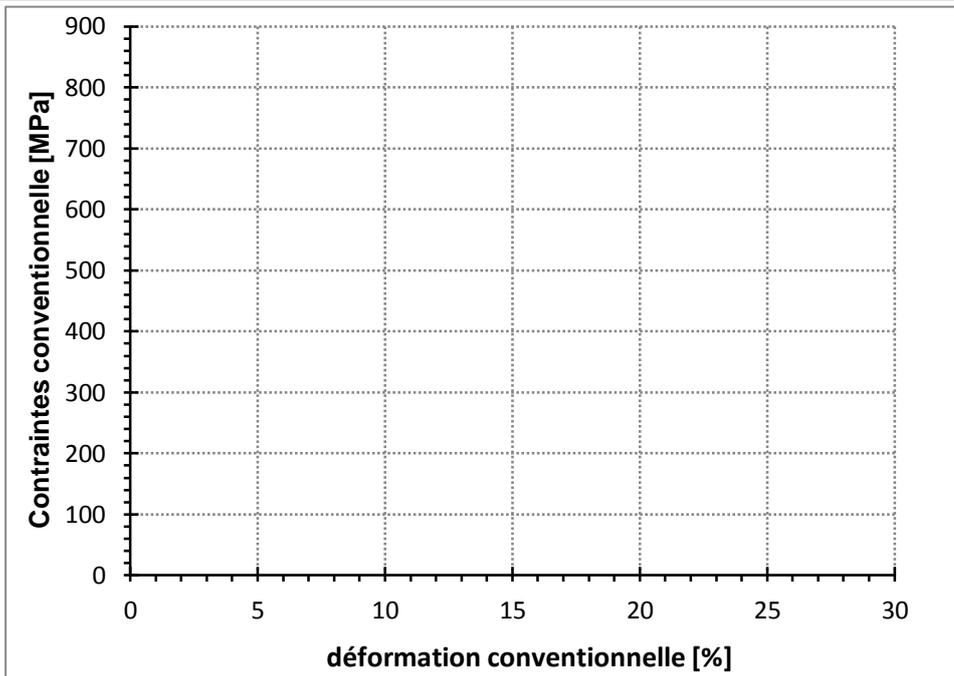


Figure 1 : Courbe conventionnelle de traction d'un acier Dual-phases DP600

3. Déduire et illustrer graphiquement sur la courbe de la **figure 1** les caractéristiques mécaniques suivantes tout en précisant, notamment, leurs unités:

- Limite d'élasticité. **Re** :
- Résistance minimale à la traction. **Rm** :

- Limite conventionnelle d'élasticité. $R_{e0,2}$:
- Module d'élasticité. E :
- Allongement à la rupture. $A\%$:

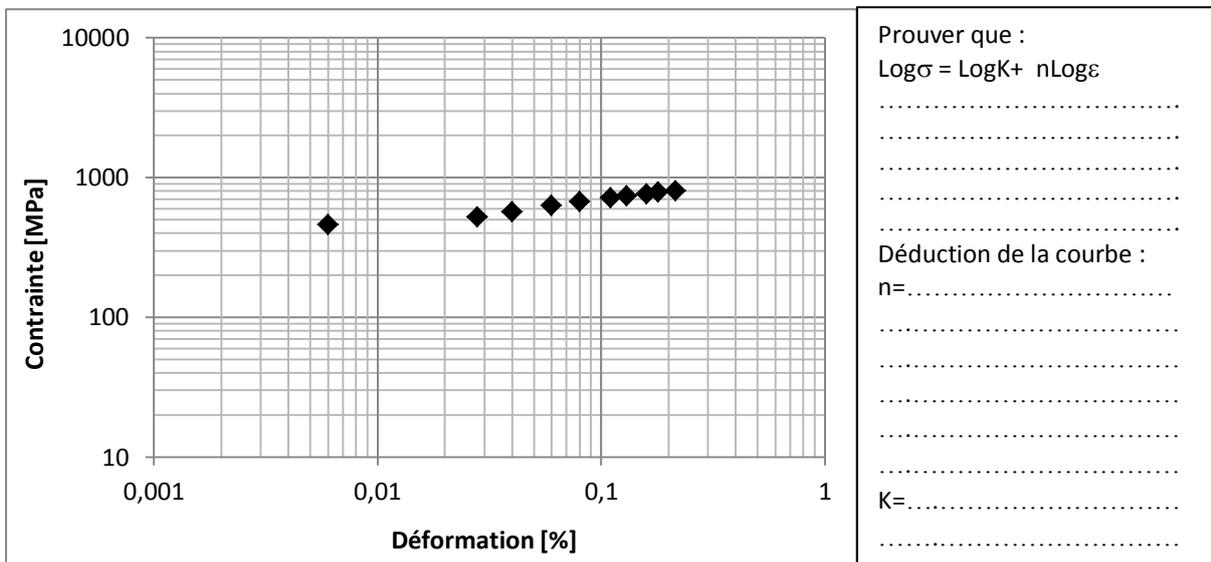
4. Expliquer pourquoi nous devons se limiter au domaine à comportement plastique en déformation homogène pour étudier l'écroutissage des matériaux.

.....

.....

.....

5. On vous donne la représentation des contraintes et des déformations sur une échelle logarithmique et on vous demande de déduire le module d'écroutissage K (en MPa) et de calculer le coefficient d'écroutissage n . Le modèle de plasticité est $\sigma = K\varepsilon^n$.



6. Calculer pour la contrainte de 461 MPa la section S_0 , ε_T , ΔD et l_0 .

On vous donne le coefficient de Poisson $\nu = 0.3$, la force élastique $F_e = 23172.4$ N et le volume initial $V_0 = 2513.3 \text{ mm}^3$ (l'éprouvette est d'une forme cylindrique de diamètre D)

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

Exercice 2 : Liaisons interatomiques et énergie de cohésion

Les liaisons interatomiques ont un impact direct sur les propriétés thermo-physiques des structures ainsi que sur leurs comportements macroscopiques. La maîtrise et la formulation de ces liaisons et la connaissance de leurs énergies de cohésion permettront de comprendre la corrélation propriétés-microstructure des alliages industriels.

1. Remplir le tableau ci-dessous en vue d'extraire la liaison interatomique mise en évidence entre les atomes de cuivre Cu (à 29 e⁻ avec 18 e⁻ sur la troisième couche M) et deux atomes de fluor (F à 9 e⁻ et de Lithium Li à 3e⁻).

Atomes en liaison	Les équilibres chimiques mets en jeu	Schémas descriptifs de la liaison	Nom de la liaison	Nature de la liaison (forte ou faible)
"n" atomes de cuivre Cu n : entier
Un atome de Fluor F et un atome de Lithium Li

2. La liaison qui s'établie entre les deux atomes de titane Ti et de carbone C est forte de type covalente ; son énergie de cohésion à l'équilibre est $U_c(r_0)=U_0$ (en eV). L'expression de cette énergie est de la forme. $U_c(r) = A \cdot \exp\left(\frac{r}{r_0}\right) - \frac{B}{r^2}$.

2.1. Exprimer les constantes A et B en fonction de r_0 et U_0 .

.....

2.2. Etablir l'expression le module d'Young E en fonction de r_0 et U_0 . On donne :

$E(r) = \frac{1}{r_0} \cdot \frac{d^2U(r)}{dr^2}$. Calculer E pour $U_0=-12.4\text{eV}$, $r_0=3.6\text{Å}$ ($1\text{eV}=10^{-19}\text{J}$ et $1\text{Å}=10^{-10}\text{m}$).

.....

10. Applications 1 (Extraits des Travaux dirigés)

Exercice 1

L'or (Au), de masse atomique égale à 197 g.mol^{-1} , se cristallise dans le système cubique. Le paramètre de la maille élémentaire « a » est égal à $4,070 \text{ \AA}$ ($1 \text{ \AA} = 10^{-10} \text{ m}$) et la masse volumique ρ est de $19,32 \text{ g.Cm}^{-3}$.

1. Déterminer le nombre d'atome par maille
2. Dédire le type du réseau cristallin de l'or
3. Faire une représentation en perspective de la maille élémentaire.
4. Exprimer en fonction de « a » puis calculer le rayon atomique « r_a » de l'or,
5. Calculer les distance interatomiques dans les familles des directions cristalline suivantes : $\langle 200 \rangle$; $\langle 110 \rangle$; $\langle 222 \rangle$ et $\langle 111 \rangle$.

Exercice 2

Le cuivre (Cu) se cristallise dans le système cubique à face centrées et sa masse volumique à pour valeur 8920 Kg/m^3 .

1. Représenter la maille représentative et indiquer les atomes tangents entre eux.
2. Calculer le rayon atomique du cuivre
3. On considère l'alliage cuivre-argent (Cu-Ag), dont la structure est également cubique à faces centrées, des atomes d'argent remplacent les atomes de cuivre **aux huit sommets** dans le motif final.
 - 3.1. Quel type d'alliage a-t-on faire.
 - 3.2. Calculer la nouvelle valeur « a' » de l'arrête de la maille, sachant que le rayon atomique de l'atome de l'argent est de $0,144 \text{ nm}$.
 - 3.3. Déterminer la masse atomique de cet alliage

On vous donne les masses molaires des deux atomes : Cu : $63,5 \text{ g.mol}^{-1}$ et Ag : 108 g.mol^{-1} .

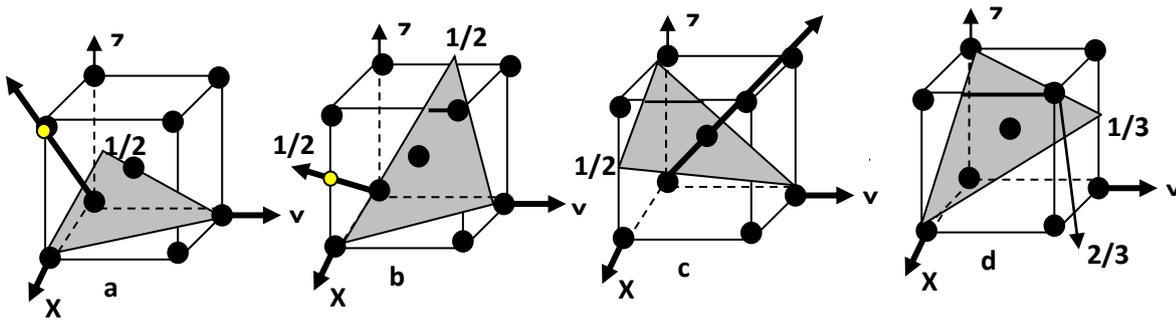
Exercice 3

L'argent (Ag) de masse molaire atomique égale à 108 g.mol^{-1} , se cristallise dans le système cubique réseau à face centrées. Sa masse volumique est de $19,32 \text{ g.Cm}^{-3}$.

1. Donner les indices de Miller (hkl) des plans et des directions les plus denses.
2. Calculer le paramètre « a » de la maille d'Argent.
3. Exprimer en fonction de « a » puis calculer le rayon atomique « r_a » de l'Argent,
4. Calculer les distances interatomiques (distances inter-réticulaires) des plans (111), (222), (110) et (121).

Exercice 4

1. En se référant à la figure ci-dessous déterminer les indices de Miller (hkl) des plans teintés (effectuer les calculs si nécessaire).
2. Pour la même figure, déterminer les coordonnées [u v w] des directions cristallines indiquées en flèches gras.



Exercice 5

On s'adresse dans cette partie à l'identification des directions cristallographiques et aux plans cristallins de la structure CFC.

1. Directions cristallographiques, **figure 2 du document réponse.**
 - 1.1. déterminer les coordonnées cristallines des directions mentionnées en traits gras.
 - 1.2. Déterminer la distance interatomique (qui sépare deux atomes successifs sur une direction) pour les directions mentionnées.
 - 1.3. Classifier, donc, dans l'ordre décroissant les directions les plus denses. Justifier la réponse.
2. Plans cristallins, **figure 3 du document réponse.**
 - 2.1. Représenter sur la figure 3 de document réponse les plans cristallins suivants : (110) (sur la figure 3.a) et $(\bar{1}11)$ (sur la figure 3.b).
 - 2.2. Donner les indices de Miller du plan présenté sur la figure 3.c.
 - 2.3. Calculer la compacité C de la maille élémentaire d'une structure CFC.

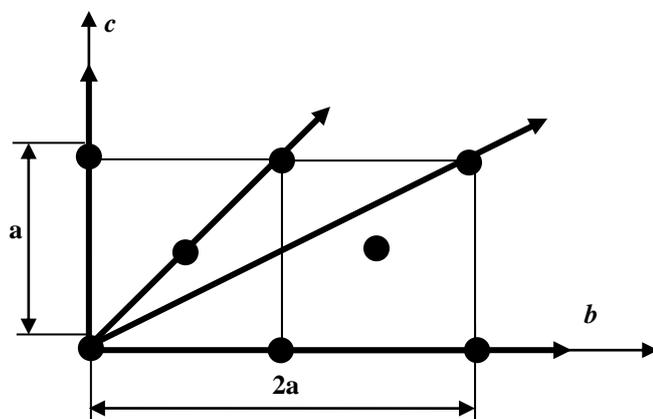
On vous donne

$$V_{\text{sphère}} = \frac{4\pi r^3}{3} \text{ et } C = \frac{\text{Volume réel occupé par les atomes dans une maille}}{a^3}$$

NB : En assimile les atomes de la maille par des sphères de rayon r



Structure CFC



Plan (bc) d'une maille CFC