



République algérienne démocratique et populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Abbes Laghrou Khenchela
Faculté des Sciences et Technologies
Département des Sciences de la Matière

MEMOIRE

Présentée pour l'obtention du diplôme de Master LMD

En chimie

Spécialité : Chimie des Matériaux

Intitulée :

Alliage : céramique et métaux étude structural et propriétés physicochimiques.

Présenté Par :

- ❖ *Boumaâraf azeddine.*
- ❖ *Djeblaoui mohamed lamine.*

Dirigé par :

Dr. Takouachet Redhouane

Devant le jury :

NOM

- *Badis Zakaria*
- *Rougai Sabrina*
- *Takouachet Redhouane*

Université

- U. Abbes Laghrou Khenchela*
- U. Abbes Laghrou Khenchela*
- U. Abbes Laghrou Khenchela*

- présidente*
- Examinatrice*
- Encadreur*

Année universitaire : 2019-2020

DEDICACES :

Je dédie ce travail :

*A mes chers parents, pour qu'ils sachent combien je les aime, que Dieu les protège
et prenne soin d'eux*

*A mon cher frère, que j'aime, il a surpassé tout le monde par sa joie pour moi
monir.*

À mon petit frère Waeil

À mes sœurs Sosa et Nisreen

*Au professeur et directeur de la Faculté des sciences de la matière, le professeur
Hezile Nawal*

*A mes amis du département, pour qui les années se sont écoulées pleines de joie et
de bonheur :*

Malek-saàid-brakni.med-ramzi

A tous les amis du département de chimie des matériaux

Merci à tous. Je vous souhaite bonheur et succès dans ce monde.

REMERCIEMENTS :

*Avant tout merci à dieu qui ma donné le courage et la volonté pour réaliser ce travail de recherche scientifique sous la direction du **Dr. Monsieur Takouachet Redhouane***

Je tiens à lui mentionner mon profond respect et mes remerciements pour son aide et ses divers conseils fructueux pour réaliser ce travail.

Je tiens à témoigner ma reconnaissance aux membres de Jury:

*Je remercie le Dr : **Badis Zakaria***

*Je remercie le Dr : **Rougai Sabrina***

Je tiens à remercier également les membres de notre équipe de recherche, l'équipe administrative du département de chimie des matériaux ainsi que tous ceux qui ont contribué à la réalisation de ce travail.

*Je voudrais surtout remercier deux amis et collègues **Bouchareb .N** et **Telli. D** qui ont été les première à m'avoir fait découvrir le sujet qui a guidé ma lettre et je les remercie beaucoup pour le soutien moral et intellectuel tout au long de mon travail.*

En fin, je remercie ma famille pour le soutien qu'elle m'a apporté durant toute la période de réalisation de ce travail.

Résumé :

*La science céramique s'intéresse à l'étude des propriétés de tous les solides inorganiques, à l'exception des métaux et alliages, que nous obtenons sous forme de produits à haute température pour une utilisation dans diverses applications. La céramique comprend les substances minérales inorganiques qui composent les roches et la boue et se présentent sous forme d'oxydes. Les produits céramiques sont fabriqués à l'aide de la technologie des poudres, de sorte que la fabrication des matériaux céramiques commence à partir de leurs poudres et non de leurs fusibles car l'obtention d'un fusible à partir d'un matériau céramique est très difficile en raison de la température de fusion élevée des matériaux céramiques (plus de **2000** degrés Celsius dans la plupart des cas) et de la difficulté de contenir la céramique fondue dans le moule de sa température de fusion. Limité.*

Liste des figures :

Chapitre I: Arrangement structural des solides cristallins.

Figure I.1: Réseau cristallin. _____	3
Figure I.2: Représentation d'une maille tridimensionnelle. _____	4
Figure I.3: Maille simple (a, b, c) et maille primitive (a). _____	4
Figure I.4: Réseau de points. _____	5
Figure I.5: Réseau à une dimension. _____	5
Figure I.6: Réseau bidimensionnel. _____	6
Figure I.7: Réseau tridimensionnel. _____	6
Figure I.8: Répétition d'un motif dans un espèce bidimensionnel. _____	7
Figure I.9: Structure cristalline. _____	8
Figure I.10 : Une schématique d'une maille cubique à faces centrées. _____	11
Figure I.11: Structure cristalline du NaCl- Structure cubique face centrée (CFC). _____	15
Figure I.12: Maille du système cristallin hexagonal compact (HC). _____	16
Figure I.13: Exemple de défauts ponctuels dans les solides cristallins. _____	17
Figure I.14: Une dislocation coin du point de vue des milieux continus (c'est-à-dire en faisant abstraction des atomes). _____	18
Figure I.15: Une dislocation coin avec représentation des atomes au voisinage de la dislocation. _____	18
Figure I.16: Déplacement d'une dislocation dans un cristal. Le schéma montre comment les liaisons atomique du cœur de la dislocation se brisent et se referment pour permettre le mouvement de la dislocation. _____	19
Figure I.17: Une dislocation vis (a) du point de vue des milieux continus et (b) en représentant les position des atomes. _____	19
Figure I.18: Description d'un joint de grain. _____	20
Figure I.19: Maclage. _____	21

Chapitre II : Etude structurale céramique-métaux et des alliages.

Figure II.20: Microstructure typique. _____	24
Figure II.21: Etapes de l'élaboration d'une céramique. _____	27
Figure II.22: Cycle de traitement de calcination. _____	28
Figure II.23: Four de calcination. _____	28
Figure II.24: Schéma de principe d'un pressage isotatique et photo de la presse. _____	30
Figure II.25: Illustration et image de la presse uni axial à froid utilisée pour le compactage de la poudre. _____	30
Figure II.26: Moule de pressage. _____	31
Figure II.27: Cycle de traitement de frittage des pastilles. _____	32
Figure II.28: Pastilles 6h et 18h. _____	35
Figure II.29: Représentation des précipités. _____	37
Figure II.30: Solution solide d'insertion. _____	37
Figure II.31: Solution solide de substitution. _____	39
Figure II.32: Représentation des solutions solides _____	<i>Error! Bookmark not defined.</i>

Chapitre III : Les liaisons chimiques-physiques.

Figure III.38 : Liaison ionique -NaCl _____ **42**

Figure III.39 : Liaison covalente -H₂ _____ *Error! Bookmark not defined.*

Figure III.40 : Représentation schématique de la liaison métallique. _____ *Error! Bookmark not defined.*

Figure III.41 : Représentation schématique de la liaison hydrogène. _____ *Error! Bookmark not defined.*

Figure III.42 : Liaison hydrogène intermoléculaire et intramoléculaires. _____ *Error! Bookmark not defined.*

Figure III.43 : Structure secondaire en feuille plissée bêta de la chaîne polypeptidique. _____ *Error! Bookmark not defined.*

Figure III.44 : Liaison hydrogène à deux centres. _____ *Error! Bookmark not defined.*

Figure III.45 : Liaison hydrogène à trois centres. _____ *Error! Bookmark not defined.*

Figure III.46 : Liaison hydrogène chélatée. _____ *Error! Bookmark not defined.*

Figure III.47 : configuration bifurquée. _____ *Error! Bookmark not defined.*

Figure III.48 : Liaison hydrogène à quatre centres. _____ *Error! Bookmark not defined.*

Figure III.49 : Liaison hydrogène tandem. _____ *Error! Bookmark not defined.*

Sommaire :

DEDICACES : _____

REMERCIEMENTS : _____

Résumé : _____

Introduction générale _____

Chapitre I: Arrangement structural des solides cristallins.

Introduction : _____ **3**

I.1. Le cristal parfait : _____ **3**

I.1.1- Le réseau cristallin : _____ **3**

1) - Définitions : _____ **3**

2) - Notions fondamentales (Rappel) : _____ **4**

a) - Maille : _____ **4**

c) - Motif : _____ **7**

d) - Cristal : _____ **7**

I.1.2- Structure cristalline : _____ **8**

1) - Définitions : _____ **8**

2)- Les systèmes cristallins : (les 14 réseaux de Bravais) _____ **8**

I.2 - Formation des solides : _____ **15**

I.2.1 - Solides ioniques : _____ **15**

I.2.2 - Solides métalliques : _____ **16**

I.2.3 - Solides covalents : _____ **16**

I.2.3 - Solides moléculaires : _____ **17**

I.3 - Le cristal réel : _____ **17**

I.3 .1 - Défauts ponctuels : _____ **17**

I.3 .2 - Défauts linéaires ou dislocations : _____ **18**

I.3 .3 - Défaut volumique ou trois dimensions : _____ **20**

I.3 .4 - Défauts planaires : _____ **20**

Chapitre II : Etude structurale céramique-métaux et des alliages.

Introduction : _____ **23**

II - 1 - Les céramiques : _____ **23**

II-1 - 1 - Définitions : _____ **23**

II-1 - 2 - Classification des céramiques : _____ **24**

II-1 - 2 - 1- Classification selon la nature chimique : _____ **24**

II-1 - 2 - 2- Classification selon propriétés physiques : _____ **25**

II-1 - 2 - 3- Classification selon la science des matériaux: _____ **25**

II-1 - 3 - Propriétés générales des céramiques	25
II-1 - 3 - 1- Les propriétés chimiques :	25
II-1 - 3 - 2- Propriétés mécaniques :	26
II-1 - 3 - 3- Propriétés thermiques:	26
II-1 - 3 - 4- Propriétés électroniques :	26
II-1 - 4 - Techniques d'élaboration :	26
II-1 - 4 - 1- Synthèse des poudres :	27
II-1 - 4 - 2- Mise en forme :	29
II-1 - 4 - 3- Frittage :	31
II-1 - 4 - 4- Découpe et rectification :	32
II-1 - 5 - Domaines d'utilisation des céramiques:	32
II - 2 Les métaux :	33
II-2 -1- Définition :	33
II-2 -2- Propriétés caractéristiques des métaux :	33
II-2 -3- Solidification des métaux :	35
II - 2 - Les alliages :	37
II - 2 -1- Définition d'un alliage :	37
II - 2 -2- Alliage hétérogène :	37
II - 2 -3- Structure cristallin des alliages :	38
II - 2 -3-1 Définitions :	38
II - 2 -3-2 Solutions solides de substitution et d'insertion :	38
 Chapitre III : Les liaisons chimiques-physiques.	
Introduction :	41
I- Les liaisons chimiques :	41
1)- Définitions :	41
2)- Différents types des liaisons chimiques :	41
Règle de l'octet :	41
2.2 - Liaison covalente :	42
2.3- La liaison métallique	43
II- Les liaisons physiques :	44
II-1- Liaisons de type Van Der Waals :	44
II.2- Liaisons Hydrogène :	45
II.2.1- Les différents types de liaisons hydrogène :	46
II.2.2- Propriétés de la liaison hydrogène :	47
II.2.2- Les différentes configurations de la liaison hydrogène :	48
Conclusion générale	51
Références Bibliographiques :	54
ملخص :	61
Abstract :	62

Introduction générale

Le terme « céramique » nous vient du mot grec *keramikos* qui signifie « substance brûlée » révélant ainsi que les caractéristiques recherchées pour ces matériaux sont habituellement obtenues au moyen d'un traitement thermique à température élevée portant le nom de « cuisson ».

Jusqu'au milieu du XXe siècle environ, les principaux matériaux de cette catégorie, dont la matière première est l'argile, étaient connus sous le nom de « céramiques traditionnelles » et regroupaient la faïence, la porcelaine, les briques, les tuiles, les verres et les céramiques à haute température. D'importants progrès ont récemment été accomplis dans la compréhension des caractéristiques fondamentales de ces matériaux ainsi que des phénomènes qui s'y produisent et qui sont à l'origine de leurs propriétés distinctives. Une nouvelle génération de ces matériaux est alors apparue, l'élargissant considérablement le sens du terme « céramique ». Ces nouveaux matériaux sont, à divers degrés, très présents dans notre vie depuis que leur utilisation s'est généralisée dans les domaines de l'électronique, de l'informatique, des communications, de l'aérospatiale et dans une foule d'autres secteurs industriels.

En général, les matériaux céramiques sont de mauvais conducteurs d'électricité et de chaleur, mais ils résistent mieux que les métaux et les polymères aux conditions extérieures rigoureuses et aux températures élevées. En ce qui concerne leurs propriétés mécaniques, les céramiques sont à la fois dures et très fragiles. [1]

Comme on le sait l'homme préhistorique n'utilisait que les cailloux pour satisfaire ses besoins matériels, c'était l'âge de la pierre, ensuite découvrit l'argile, matériau mou et malléable qui était transformé après cuisson en matériau indéformable et imperméable.

Vint ensuite l'âge du fer et du bronze qui forme en fait l'âge des métaux. Les métaux occupent une place importante aujourd'hui comme avant du fait qu'ils se prêtent à tous les usages (outils, armes, pièces mécaniques^ divers équipements etc.)

L'utilisation des métaux purs possède beaucoup d'inconvénients tels que faibles propriétés mécaniques, électriques, coûts très élevés etc... [2]

Un alliage est une combinaison d'un métal avec un ou plusieurs autres éléments. Lorsque dans un alliage la teneur en élément d'alliage augmente, on peut avoir formation de phases sous forme de précipités et d'intermétalliques. On peut constater dans le diagramme de phase de système d'alliages binaires qu'une grande gamme de microstructures peut être obtenue selon des compositions différentes et des traitements thermiques différents. La microstructure du solide obtenu dépend des paramètres de la solidification : vitesse de refroidissement, gradients thermiques. [3]

L'objectif de notre travail est l'étude structurale des métaux céramiques, et des alliages. Le présent mémoire se découpe en six chapitres :

- Chapitre I: Arrangement structural des solides cristallins.
- Chapitre II: étude structurale céramique et métaux.
- Chapitre III : Les liaisons chimiques-physiques.

Chapitre I:

Arrangement structural des solides cristallins

Introduction :

Tous les matériaux qui nous entourent sont formés d'atomes et de molécules. L'arrangement et la relation qui existent entre ceux-ci expliquent certaines de leurs propriétés. Pendant longtemps les physiciens, en se fondant sur l'apparence immédiate des corps (cf. glossaire) qui nous entourent, ont distingué les états solide, liquide et gazeux. La classification actuelle repose sur la structure atomique des matériaux et ne considère plus que deux états. [4]

I.1. Le cristal parfait :

Un cristal parfait est un ensemble de particules empilées régulièrement dans l'espace. Il forme une structure tri périodique à la base du modèle ; idéalement, il est sans défaut et de dimension infinie. Les particules du cristal peuvent être constituées d'atomes, d'ions, d'une ou de plusieurs molécules, dont la structure peut contenir plusieurs milliers d'atomes (protéines). [5]

I.1.1- Le réseau cristallin :

1) - Définitions :

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. La maille élémentaire (voir schéma ci-contre). Est définie par trois vecteurs \vec{a} ; \vec{b} ; \vec{c} . Après avoir choisi une origine des axes, la position d'un quelconque des nœuds du réseau est donnée par le vecteur [6] :

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

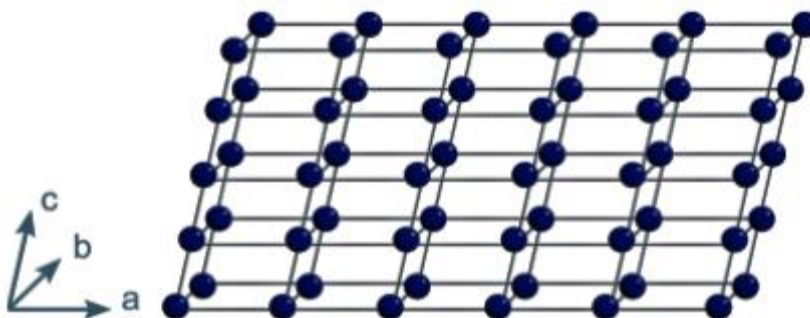


Figure I.1: Réseau cristallin [7].

2) - Notions fondamentales (Rappel) :

a) - Maille :

Une maille est une unité de base en parallèle à partir de laquelle on peut engendrer tout le cristal uniquement par des translations. Elle est définie par une origine « O » et trois vecteurs de base \vec{a} , \vec{b} , et \vec{c} . Les mesures α , β , γ sont des angles entre les vecteurs de base (Figure I.2). [8]

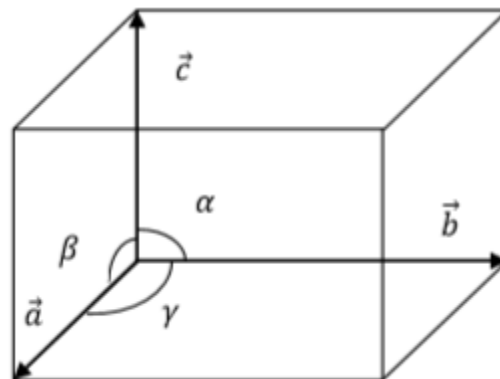


Figure II.2: Représentation d'une maille tridimensionnelle. [9]

Le choix d'une maille n'est pas unique car il existe une infinité de mailles pouvant être choisies pour engendrer un cristal. Parmi celles-ci, on appelle maille élémentaire ou primitive une maille de volume minimal, donné par la valeur du produit mixte des trois vecteurs de base soit :

$$v = |\vec{a} \cdot (\vec{b} \times \vec{c})|$$

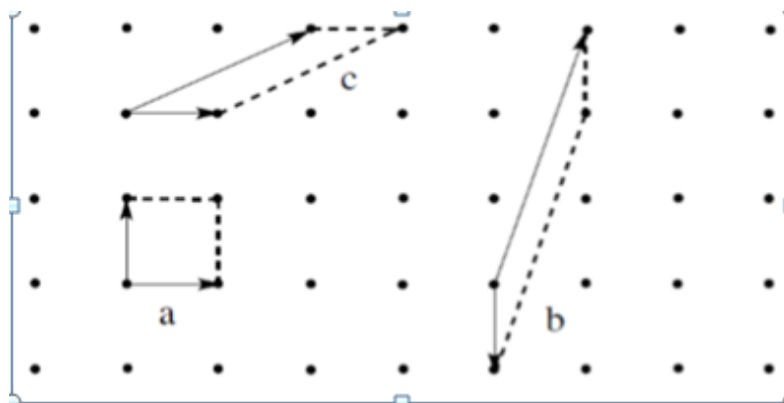


Figure III.3: Maille simple (a, b, c) et maille primitive (a).

Par ailleurs, la maille de description doit faire apparaître toutes les symétries du système, ce qui n'est pas toujours le cas de la maille élémentaire. Il est alors utile de considérer une maille multiple ou conventionnelle, comportant plusieurs nœuds (qui ne sont pas tous situés aux sommets de la maille), faisant clairement apparaître la symétrie de la structure. Le nombre de nœuds inclus dans la maille est appelé ordre – ou multiplicité – de la maille. Sur la **Figure I.4** apparaît une maille primitive d'ordre 1 qui contient seulement des nœuds aux sommets de la maille. La maille multiple d'ordre 2 contient, plus des nœuds aux sommets, un nœud au centre du volume. [10]

b) - Réseau ponctuel :

Un réseau ponctuel (réseau de points) est une répartition périodique de points. Il est uni-bi ou tridimensionnel. [11]

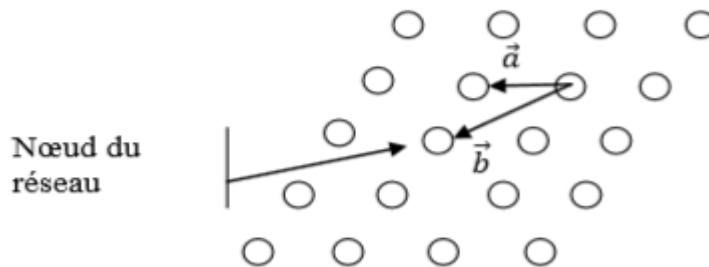


Figure I.4: Réseau de points

➤ Réseau à une dimension :

Il n'y a qu'un seul réseau possible une succession de nœud équidistant. Le vecteur de translation est donné par [12] : $r = u\vec{a}$

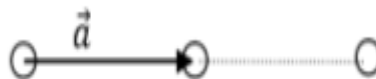


Figure I.5: Réseau à une dimension.

➤ **Réseau à deux dimensions :**

On peut les construire sur deux vecteurs \vec{a}, \vec{b} , c'est-à-dire sur trois paramètres a, b et γ . \vec{a}, \vec{b} Sont les nomes des plus petites translations le long de rangées parallèles, et γ l'angle que celle-ci forment entre elles. Ou le vecteur de translation est :

$$r = u\vec{a} + v\vec{b}$$

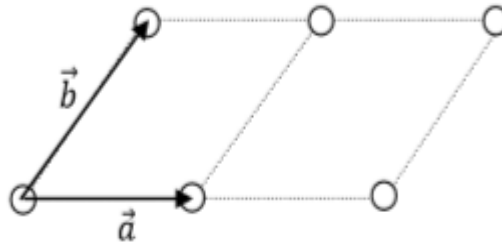


Figure I.6: Réseau bidimensionnel.

➤ **Réseau à trois dimensions :**

En général, il est représenté par les vecteur $\vec{a}, \vec{b}, \vec{c}$ et les angles α, β et γ , le vecteur de translation est donné par :

$$r = u\vec{a} + v\vec{b} + w\vec{c} \quad \text{Avec : } u, v, w \text{ entiers relatifs.}$$

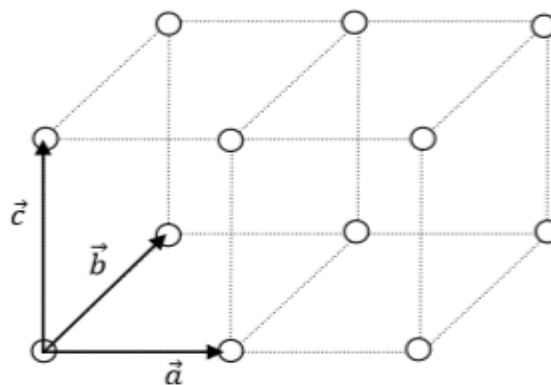


Figure I.7: Réseau tridimensionnel.

c) - Motif :

Le motif est un assemblage, a priori quelconque, d'atomes ou d'ions. Ca peut être un simple atome (cas fréquent pour les métaux) ou un ensemble de molécules ou d'ions. [13]

✓ **Exemples :** [14]

- Le cristal de sodium : le motif est atome de sodium Na.
- Dans le métal cuivre, le motif est constitué par un seul atome de cuivre. Dans $(CaCO_3)$, le motif est constitué par les ions Ca^{2+} et CO_3^{2-} .

d) - Cristal :

Un cristal est constitué de répétition tridimensionnelle périodique d'un motif atomique. [15]

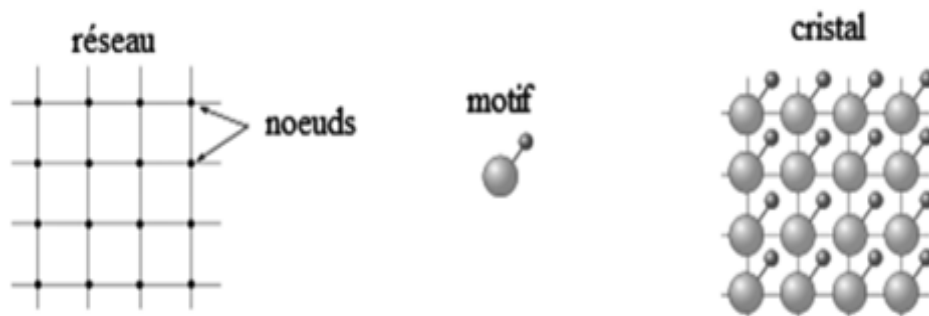


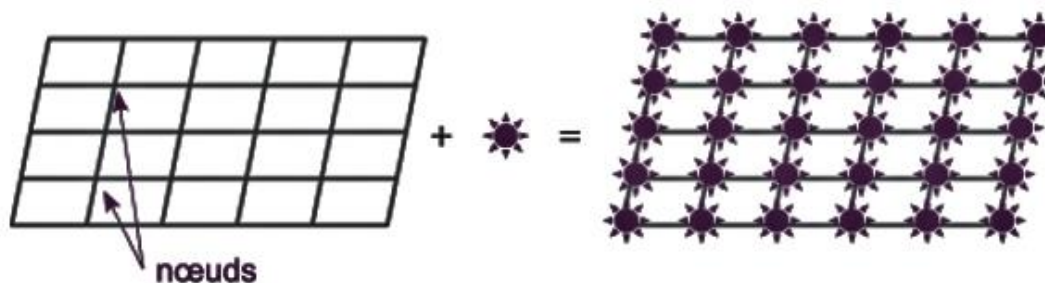
Figure I.8:Répétition d'un motif dans une espèce bidimensionnelle.

1.1.2 - Structure cristalline :

1) - Définitions :

D'une façon plus simple, une structure cristalline est formée d'un réseau de nœuds plus un motif (**Figure 1.9**). Ainsi, par exemple, dans un cristal de cuivre, le motif est l'atome de cuivre. Dans un cristal de benzène, le motif est une molécule de benzène. Dans un cristal de carbonate de calcium, le motif est formé d'un ion calcium et d'un ion carbonate. Dans un cristal de fluorure de calcium CaF_2 le motif est formé d'un ion calcium et de deux ions fluorure. [16]

La structure cristalline est donc déterminée à la fois par son motif et par son réseau :



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

Figure 1.9: Structure cristalline. [17]

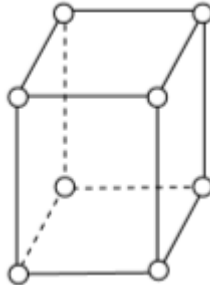
2)- Les systèmes cristallins : (les 14 réseaux de Bravais)

Auguste Bravais (1848) a montré que le nombre de systèmes cristallins possibles était très limité. Il a répertorié 14 types de réseaux qui sont des variantes de seulement 7 systèmes cristallins. Les 7 systèmes cristallins sont engendrés par les différentes combinaisons possibles d'un côté entre les paramètres linéaires (a, b et c) et de l'autre côté entre les paramètres angulaires (α, β et γ).

La maille est parfois primitive (P) avec un seul site par maille. Si un deuxième site existe au centre de la maille, c'est une maille centrée (I, de l'allemand Innenzentriertes). Lorsque chacune des six faces comportent un site (F, de l'allemand Flächenzentriertes), ce site étant commun à deux mailles contigües, cela fait quatre sites par maille. On rencontre parfois aussi des mailles avec seulement deux faces centrées "C: plan (a, b) centré"; "B: plan(a, c) centré" et "A: plan (b, c) centré", soit deux sites par maille. Pour ce dernier type on compte seulement un seul type C, B, ou A. Donc, on compte 4 modes de réseaux (P, I, F, et C). [18]

➤ **Réseaux simples ou primitifs P :**

Si chaque nœud est commun à 8 mailles P donc cette dernière contient : $1/8 \times 8 = 1$ atome.



Maille élémentaire primitive

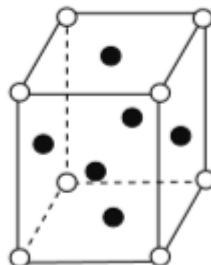
Pour toute maille élémentaire :

- Les nœuds à l'intérieur des mailles comptent pour 1.
- Les nœuds aux sommets des mailles comptent pour $1/8$.
- Les nœuds sur les arêtes des mailles comptent pour $1/4$.
- Les nœuds sur une face de maille comptent pour $1/2$.

➤ **Réseaux à bases centrées A, B ou C selon le type de faces centrées :**

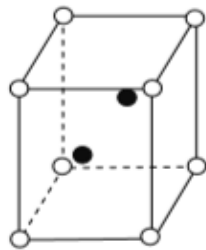
C'est une maille double :

$$1/8 \times 8 + 2 \times 1/2 = 2 \text{ nœuds au total.}$$

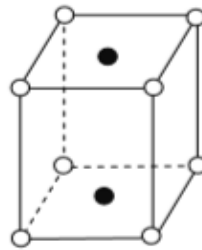


Maille élémentaire dont toutes les faces sont centrées

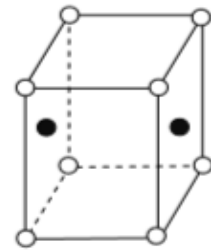
Les trois types :



Mode A



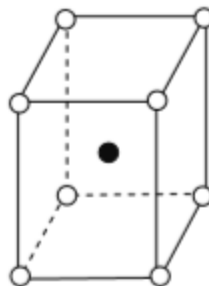
Mode B



Mode C

➤ **Réseaux centrés I :**

Sommets : $8 \times 1/8 = 1$ et 1 au centre au total $1 + 1 = 2$ nœuds.



Maille élémentaire centrée

➤ **Réseaux à faces centrées F :**

Sommets : $8 \times 1/8 = 1$ et $6 \times 1/2 = 3$ Donc : 4 nœuds au total.
Les nœuds des faces comptent pour $1/2$.

La figure ci-dessous, nous montre une coupe schématique d'une maille cubique à faces centrées montrant la proportion $1/8$ au niveau de chaque sommet et la proportion $1/2$ pour chacun des atomes situés sur la face. [19]

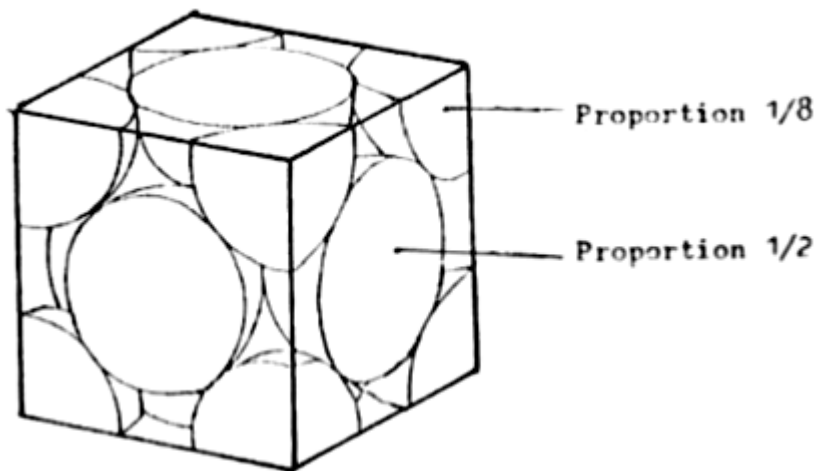


Figure I.10: Une schématique d'une maille cubique à faces centrées.

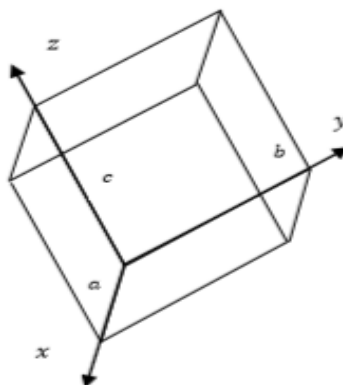
Si l'on combine les 7 systèmes cristallins aux 4 modes de réseaux possibles, on définit les 14 réseaux de Bravais, tous les modes de réseaux n'étant pas compatibles avec la symétrie des systèmes. [20]

Exemples :

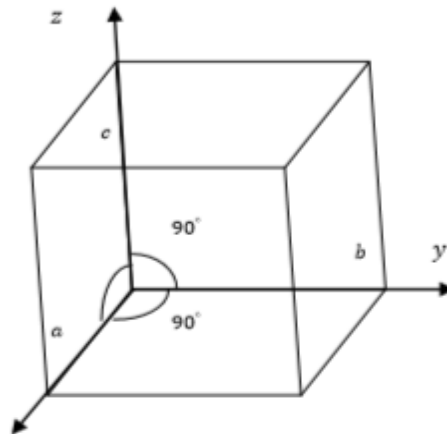
Pour le système orthorhombique, il existe les 4 modes P, C, I, et F. en revanche, pour le système rhomboédrique, il n'existe que le mode P appelé également R.

✓ **système *Triclinique* :** Le cristal fondamental est un parallélépipède oblique. Il n'admet qu'un seul centre de symétrie à l'intersection des diagonales. Il possède donc:

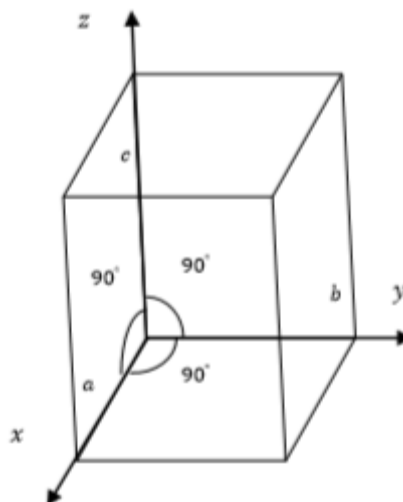
- 1 centre de symétrie.
- 1 seul mode de réseau de Bravais qui est le primitif (**P**).
- $\begin{cases} a \neq b \neq c \\ \alpha \neq \beta \neq \gamma \neq 90^\circ \end{cases}$



- ✓ **système Monoclinique :** le cristal fondamental est un prisme droit sur une base rhombique (en losange) incliné dans une seule direction. Il admet :
- 1 centre de symétrie.
 - 1 seul axe de symétrie.
 - deux réseaux de Bravais : primitif (**P**) et à bases centrées (**C**).
 - $\begin{cases} a \neq b \neq c \\ \alpha = \beta = 90^\circ, \gamma \neq 90^\circ \end{cases}$

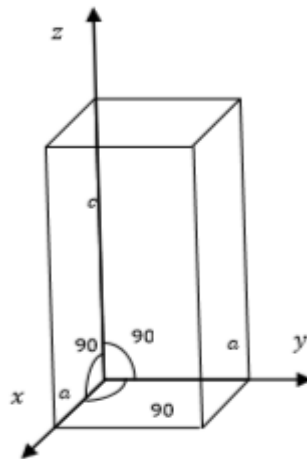


- ✓ **système Orthorhombique :** la Forme géométrique est un prisme droit à base rectangulaire. Il possède :
- 3 axes d'ordre 2
 - 1 seul axe de symétrie.
 - 4 réseaux de Bravais : primitif (**P**), à bases centrées (**C**), centré (**I**) et à faces centrées (**F**).
 - $\begin{cases} a \neq b \neq c \\ \alpha = \beta = \gamma = 90^\circ \end{cases}$



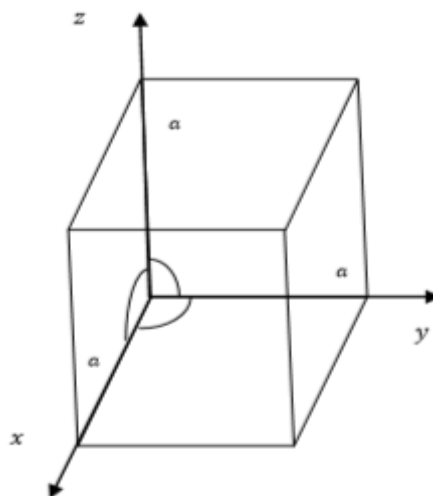
✓ **système *Quadratique ou tétragonal* :** le cristal fondamental est un prisme droit à base carrée. Il admet :

- 3 axes d'ordre 4
- 4 axes d'ordre 2 : dont deux sont orthogonaux entre eux.
- 2 réseaux de Bravais : primitif (**P**) et centré (**I**).
- $\begin{cases} a = b \neq c \\ \alpha = \beta = \gamma = 90^\circ \end{cases}$



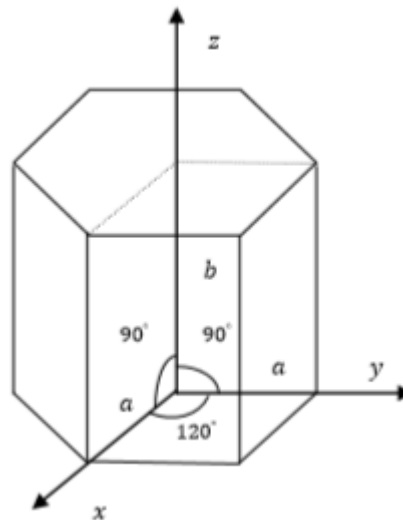
✓ **système *Rhomboédrique* :** la géométrie fondamentale est limitée par six losanges égaux. Il admet :

- 1 centre de symétrie.
- 1 axe d'ordre 3
- 3 axes d'ordre 2
- 1 seul réseau de Bravais : primitif (**P**).
- $\begin{cases} a = b \neq c \\ \alpha = \beta = \gamma \neq 90^\circ \end{cases}$



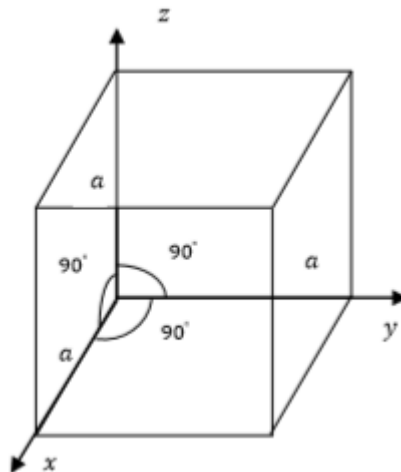
✓ **système Hexagonal :** le cristal est un prisme droit à base hexagonale. Il a :

- 1 centre de symétrie.
- 1 axe d'ordre 6
- 6 axes d'ordre 2
- 1 seul réseau de Bravais : primitif (**P**).
- $\begin{cases} a = b \neq c \\ \alpha = \beta = 90^\circ, \gamma \neq 90^\circ \end{cases}$



✓ **système Cubique :** la forme fondamentale est un cube. Il a :

- 3 axes d'ordre 4
- 1 axe d'ordre 3
- 6 axes d'ordre 2
- 3 réseaux de Bravais : primitif (**P**), centré (**I**) et à faces centrées (**F**)
- $\begin{cases} a = b = c \\ \alpha = \beta = \gamma = 90^\circ \end{cases}$



1.2 - Formation des solides :

Les solides peuvent être classés en fonction des liaisons qui lient les atomes et les molécules entre eux. Cette classification permet de déterminer des solides ioniques, métalliques, covalents et moléculaires.

1.2.1 - Solides ioniques :

La structure cristalline des solides ioniques est régie par deux facteurs relativement simples - les ions sont entourés par des champs électrostatiques non directionnels : (1) Formation d'un réseau tridimensionnel régulier, énergétiquement bénéfique, entre les ions chargés positivement et négativement ; (2) puisque les charges opposées se repoussent, elles ne peuvent pas venir au contact l'une de l'autre. Les ions chlorures, nitrures et oxydes des métaux sont les groupements de base des matériaux connus comme étant les céramiques, dans lesquels se trouvent les verres. Ces matériaux sont très stables grâce à leurs très fortes liaisons ioniques (*Ex* : Chlorure de sodium) (**Figure I.11**).



Figure I.11: Structure cristalline du NaCl- Structure cubique face centrée (CFC).

L'ion Na^+ est plus petit que l'ion Cl^- . Il faut que l'ensemble du cristal reste électriquement neutre, il y a donc un ion Na^+ pour un ion Cl^- et le centre de la maille est occupé par un ion Na^+ .

1.2.2 - Solides métalliques :

Un arrangement similaire à celui des solides ioniques est possible avec la liaison métallique. Les atomes ont de faibles électronégativités et par conséquent, les électrons sont délocalisés entre tous les atomes. Le nuage électronique forme la base des métaux. Les trois structures les plus fréquentes dans les métaux sont les structures cubiques centrées (CC) (Figure 12), cubiques à faces centrées (CFC) (Figure 13) et hexagonales compactes (HC) (*Figure 1.12*). [21]

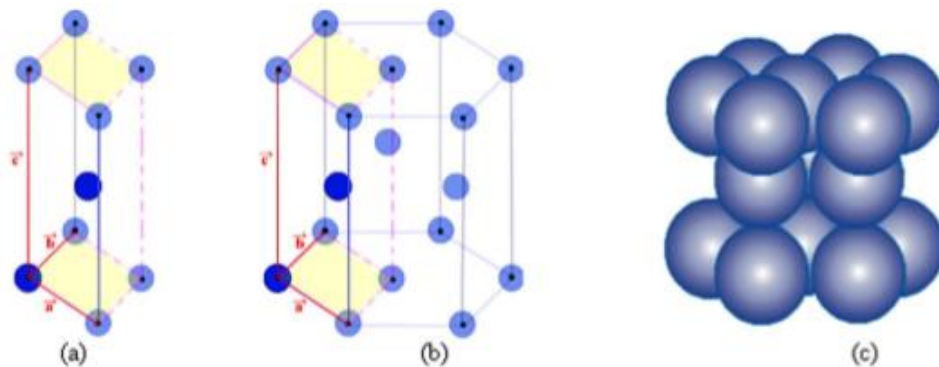


Figure 1.12: Maille du système cristallin hexagonal compact (HC). [22]

- (a) maille élémentaire : prisme droit à base losangique (coté a , angles 60 et 120°).
- (b) maille de la structure hexagonale compacte (HC).
- (c) Représentation des atomes.

1.2.3 - Solides covalents :

Les solides covalents sont construits avec des éléments de la colonne IV du tableau Périodique (C, Si, Ge, Sn). Ces éléments ont quatre électrons périphériques qu'ils mettent en Commun avec quatre voisins pour établir des liaisons covalentes.

Les électrons de valence sont liés mais leur énergie de liaison est beaucoup plus faible que dans les solides ioniques. Cette énergie de liaison est importante dans le carbone diamant, ce qui en fait un isolant, elle est nulle dans l'étain, ce qui en fait un conducteur. Dans le silicium et le germanium cette énergie a une valeur intermédiaire qui fait de ces matériaux des semi-conducteurs.

1.2.3 - Solides moléculaires :

Les solides moléculaires, comme leur nom l'indique, sont bâtis sur une unité de base qui n'est plus l'atome mais la molécule. Les forces de liaison sont grandes à l'intérieur de la molécule mais du type Van der Waals entre molécules et par conséquent faibles. Ces matériaux sont peu résistants et fondent à basse température. [23]

1.3 - Le cristal réel :

Un cristal comporte des défauts (défauts de réseau) même s'ils sont peu nombreux. Ces défauts ont une importance considérable puisqu'ils déterminent un grand nombre de propriétés importantes des solides cristallins, telles que les propriétés plastiques.

Il existe quatre sortes de défauts cristallins :

- défauts ponctuels.
- défauts linéaires.
- défauts planaires.
- défauts à trois dimensions.

1.3.1 - Défauts ponctuels :

Un défaut ponctuel entraîne un défaut autour d'un point, mais les voisins sont également perturbés. Introduire un atome, c'est introduire une force. Ces défauts ponctuels entraînent donc des défauts autour d'un point (*Figure 1.13*). [24]

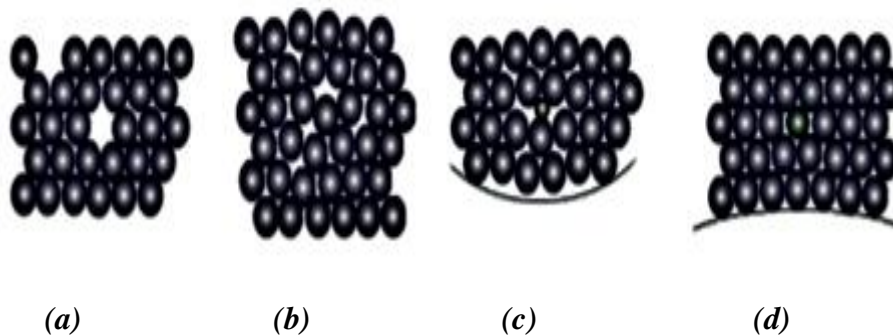


Figure 1.13: Exemple de défauts ponctuels dans les solides cristallins.

- (a)** lacune.
- **(b)** autointersticiel.
- **(c)** hétérointersticiel.
- **(d)** atome de remplacement (solution solide de substitution).

I.3.2 - 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*. [25]

a) - Dislocation coin :

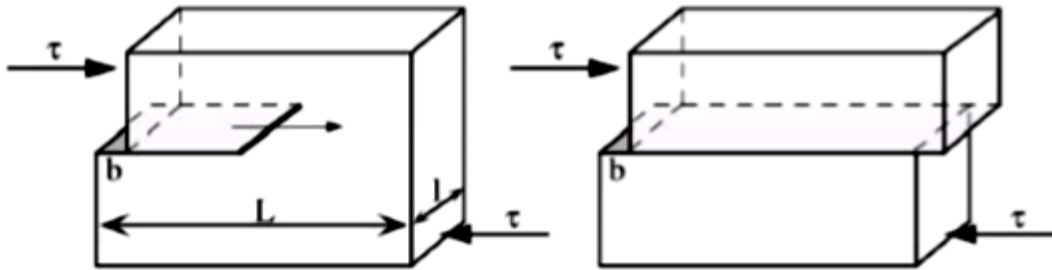


Figure I.14: Une dislocation coin du point de vue des milieux continus (c'est-à-dire en faisant abstraction des atomes) [26].

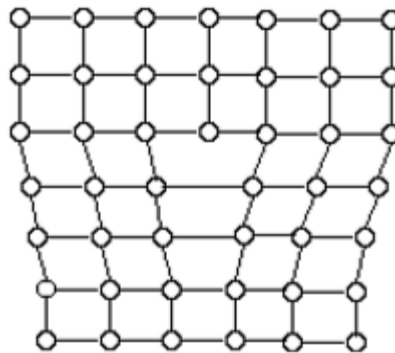


Figure I.15: Une dislocation coin avec représentation des atomes au voisinage de la dislocation [27].

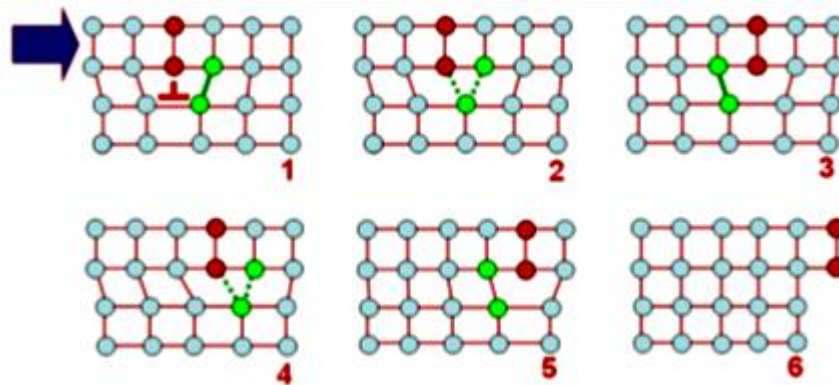


Figure I.16: Déplacement d'une dislocation dans un cristal. Le schéma montre comment les liaisons atomique du cœur de la dislocation se brisent et se referment pour permettre le mouvement de la dislocation [28].

Le déplacement des dislocations produit la déformation plastique. La figure 14 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.

b) - Dislocation vis:

La dislocation vis est représentée schématiquement par la figure 16 ; 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. [29]

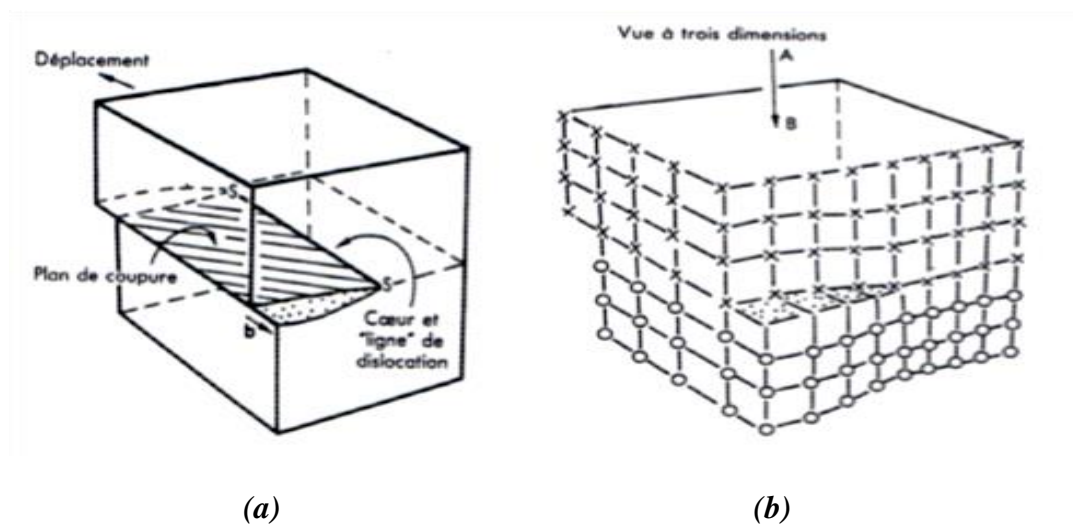


Figure I.17: Une dislocation vis (a) du point de vue des milieux continus et (b) en représentant la position des atomes [30].

I.3.3 - défaut volumique ou trois dimensions :

On a un défaut à trois dimensions quand une partie du cristal est remplacée par un volume d'un composé différent ; la différence est de nature chimique et peut ou non être accompagnée de différences cristallographiques. La partie étrangère du cristal est soit un précipité, soit une inclusion.

Les précipités sont de petites particules de seconde phase qui se sont formées entre le métal de base et un élément d'alliage. [31]

I.3.4 - défauts planaires :

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

a) - 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 poly cristallin (*Figure 18*).

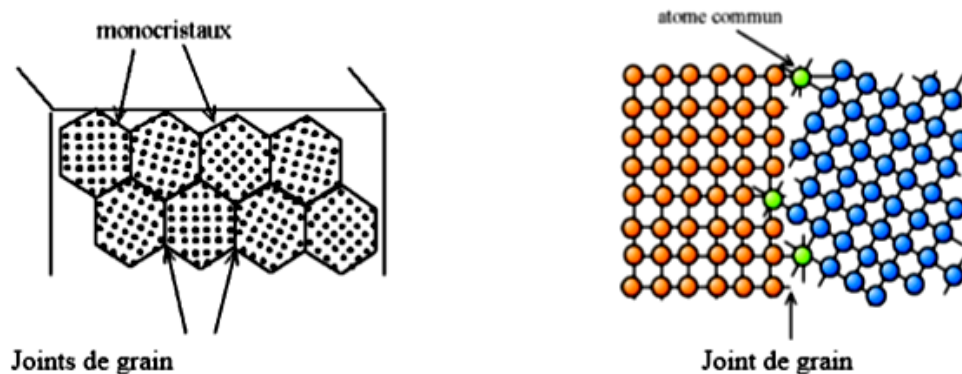


Figure I.18: Description d'un joint de grain [32].

b) - 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 maclage se rencontre souvent dans les cristaux hexagonaux, car ceux-ci possèdent moins de possibilités de glissement que les cristaux cubiques. [33]

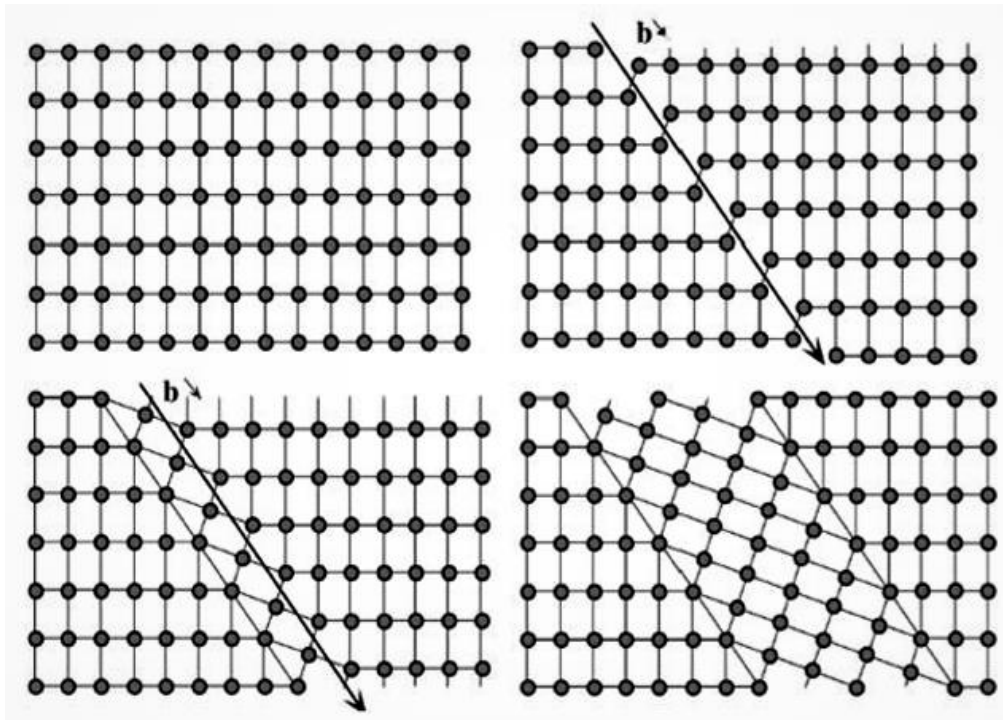


Figure I.19: Maclage [34].

Chapitre II :

Etude structurale céramique-métaux et des alliages.

Introduction :

Les céramiques sont un peu plus complexes que les structures métalliques. Elles sont composées d'éléments métalliques et de substances non métalliques tels que des oxydes, des nitrides et des silicates. Elles peuvent apparaître soit comme des solides cristallins, soit comme des solides amorphes, ce dernier groupe étant appelé des verres ou encore être une combinaison de cristaux et de verres. La cohésion de celles-ci est assurée par des liaisons ioniques ou covalentes. Par conséquent, ce sont des matériaux durs, résistants à l'usure et fragiles. Dans les céramiques, les ions chargés négativement (anions) sont souvent différents en taille des ions chargés positivement (cations).

Il y a beaucoup d'applications des céramiques en dentisterie : elles sont utilisées comme charges dans les résines composites, dans les verres ionomères et dans les céramiques de restaurations (inlays, onlays, coiffe, ...) [35].

II - 1 - Les céramiques :

II-1 - 1 - Définitions :

Le mot céramique dérive du grec « Kéramos » qui signifie argile [36]. Le terme céramique échelonné souvent des objets rustiques comme les argiles, les briques et les tuiles mais le terme céramique signifié plus généralement un solide qui n'est ni un métal ni un polymère. Une céramique est un matériau solide de synthèse qui nécessite souvent des traitements thermiques pour son élaboration. La plupart des céramiques modernes sont préparées à partir des poudres consolidées (mise en forme) et sont densifiées par un traitement thermique (le frittage) [37].

La plupart des céramiques sont des matériaux poly-cristallins, c'est à dire comportant un grand nombre de microcristaux bien ordonnés (grains) reliés entre eux par des joints des grains comme illustré sur la figure II.20.

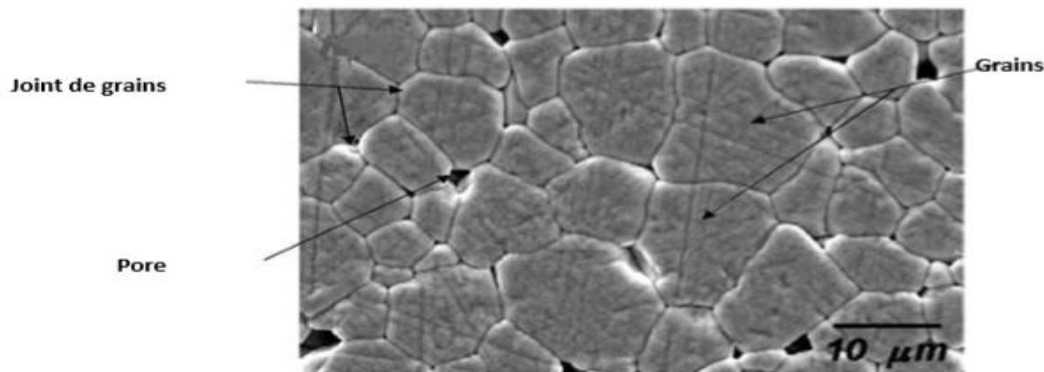


Figure II.20: Microstructure typique [38].

II-1 - 2 - Classification des céramiques :

Dans la littérature on trouve plusieurs classifications des céramiques, qui diffèrent entre eux selon le point de vue adopté.

II-1 - 2 - 1 - Classification selon la nature chimique :

Les chimistes de l'état solide attachent une importance particulière à la nature de la liaison forces, en distinguant trois types de liaisons fortes (liaison métallique, liaison ionique et liaison covalente) et différentes variantes de liaisons faibles (comme la liaison de van der Waals). Selon cette classification, Les diverses céramiques connues se répartissent en 5 grandes familles ou groupes [39].

- les éléments légers de la colonne **IVb** (C, Si, Ge, Sn, Pb) qui forment des liaisons covalentes.(diamant, silicium, carbure de silicium).
- Les métaux réfractaires ou métaux de transitions.
- Les carbures et de nitrures des métaux de transition. (températures de fusion très élevées) sont très durs et sont souvent utilisées comme abrasifs. Les oxydes (éléments de la colonne **IV** du tableau périodique des éléments). divisé en deux sous groupes, les éléments légers ou oxydes de la colonne **IV.a** et les oxydes des éléments de transition de la colonne **IV.b**.
- Les aluminosilicates qui sont les céramiques les plus répandues.

II-1 - 2 - 2 - Classification selon propriétés physiques :

Les physiciens de l'état solide sont particulièrement intéressés à la structure électronique des solides et de leurs propriétés de conduction. Il est donc naturel pour eux de les classer en solides. En fait cette classification prédestine les domaines potentiels d'utilisation [40] on trouve :

- Isolateurs.
- des semi-conducteurs.
- des conducteurs et supraconducteurs.

II-1 - 2 - 3 - Classification selon la science des matériaux:

La science des matériaux adopte une classification ternaire qui distingue les matériaux [41] par :

- Les matériaux organiques.
- Les matériaux métalliques et inorganiques.
- Les matériaux inorganiques et non métalliques.

II-1 - 3 - Propriétés générales des céramiques

Les propriétés des matériaux de construction déterminent le domaine de leur application, ce n'est qu'en évaluant exactement les qualités des matériaux, c'est-à-dire leurs propriétés les plus importantes, que l'on peut construire des édifices et ouvrages solides, durable et de haute efficacité économique et technique, toutes les propriétés des matériaux de construction, d'après, l'ensemble de leurs indices, sont divisées en propriétés physiques, chimiques et mécaniques [42].

- *Liaisons chimiques* : covalentes, ioniques et peuvent être mixtes.
- *Structures cristallographiques* : sont complexes et dépendent des liaisons.

II-1 - 3 - 1 - Les propriétés chimiques :

Sont évaluées d'après le pouvoir d'un matériau de résister aux acides, aux bases et aux solutions des sels, qui provoquent des réactions d'échanges et entraînent la destruction de la matière.

II-1 - 3 - 2 - Propriétés mécaniques :

Sont généralement fragiles, possèdent des grandes valeurs de coefficients d'élasticité en comparaisons avec les métaux.

II-1 - 3 - 3- Propriétés thermiques:

- ***Température de fusion*** : les céramiques possèdent une température de fusion très élevée qui peut dépasser 2000°C à cause de leurs liaisons chimiques qui sont fortes.

- ***Conductibilité thermiques*** : les céramiques sont des isolants thermiques à cause de l'absence totale des électrons libres [43].

II-1 - 3 - 4- Propriétés électroniques :

Les céramiques contiennent trois catégories des matériaux, isolants , semi-conducteurs et autres conducteurs mais en général la plupart des céramiques sont des isolants et leurs conductivités sont faibles par rapport aux métaux à cause de la nature des liaisons et l'absence des électrons libres [44].

II-1 - 4 - Techniques d'élaboration :

Une céramique peut être définie comme un matériau inorganique poly cristallin dont la structure est composée de grains liés les uns aux autres par des joints de grains [45].

L'élaboration des céramiques a été effectuée en plusieurs étapes comme on peut le voir sur la Figure **II.21**.

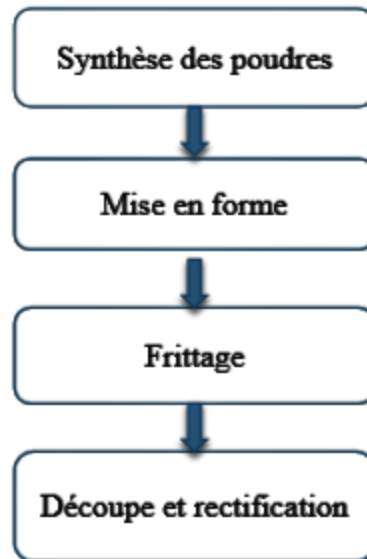


Figure II.21: Etapes de l'élaboration d'une céramique [46].

II-1 - 4 - 1 - Synthèse des poudres :

Les poudres ont été élaborées par voie solide. Ce procédé présente l'avantage d'être facile à mettre en œuvre et peu coûteux. Il consiste à faire réagir, à haute température, un mélange d'Oxyde des éléments du matériau à élaborer. Cette technique se fait en trois étapes principales :

➤ Le mélange :

Le mélange des Oxydes, appelés aussi précurseurs, se fait en milieu acétonique dans un bécher, l'étape d'homogénéisation de la poudre du mélange est réalisée par l'intermédiaire d'un agitateur magnétique, cela pendant deux heures de temps. Puis, la pâte obtenue, est séchée à 800C dans une étuve pendant deux heures, devenue poudre, elle est alors broyée dans un mortier en verre pendant six heures. Le broyage permet d'obtenir des particules fines, ce qui favorise la réaction suivante par diffusion solide /solide plus rapide. Le choix de l'acétone est basé sur le fait que celui-ci possède un point d'évaporation basse, ce qui facilite le séchage, et aussi car il ne réagit avec aucun produit du mélange. A l'aide d'une presse manuelle, la poudre obtenue est compactée sous forme de pastilles de 2 g de masse, de diamètre fixe (11mm) et d'épaisseur variable selon la force appliquée.

Chapitre II: Etude structurale céramique- métaux et des alliages.

Les précurseurs de départ sont des poudres d'oxydes tels que l'oxyde de Plomb (PbO), l'oxyde de Titane (TiO_2), l'oxyde de Zirconium (ZrO_2), l'oxyde de Niobium (Nb_2O_5), l'oxyde de Fer (Fe_2O_3) et l'oxyde de Samarium(Sm_2O_3) [47].

➤ *Traitement thermique : (calcination ou chamottage)*

Cette opération a pour but de transformer un mélange de poudres calcinées ou chamotte en une poudre ayant une composition et une structure cristalline bien déterminées. Cette poudre est soumise à un cycle thermique sous atmosphère contrôlée, ce qui conduit aux phénomènes de diffusion en phase solide, et par conséquent la formation de la phase recherchée. Le traitement de calcination (*Figure II.22*) a été fait en trois (03) étapes: une montée en température jusqu'à $900^\circ C$ à une vitesse de chauffage de $10^\circ C/min$, suivie d'un maintien d'une durée de deux (02) heures puis un refroidissement lent dans le four. Le traitement de calcination a été réalisé dans un four à moufle à régulation programmable type Kejia KJ-1800-81C (*Figure II.23*), permettant d'ajuster les principaux paramètres du traitement qui sont: la vitesse de montée en température, la durée du palier thermique et la rampe de refroidissement ainsi que l'atmosphère. [48]

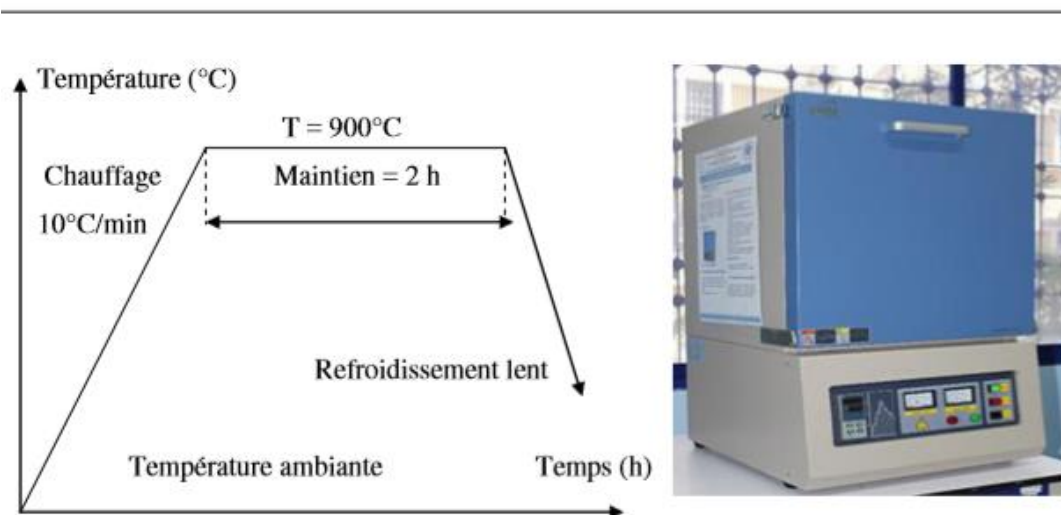


Figure II.22: Cycle de traitement de calcination. *Figure II.23:* Four de calcination.

➤ ***Second broyage :***

Après le traitement thermique, le matériau alors appelé chamotte est broyé pour séparer les agglomérats, homogénéiser la poudre qui n'a généralement pas réagi uniformément lors du chamottage, et réduire la taille des particules afin d'augmenter la réactivité de la poudre [49]. Ce broyage est réalisé dans des conditions identiques au premier broyage.

II-1 - 4 - 2 - Mise en forme :

L'objectif de cette étape est l'obtention d'un matériau cru suffisamment dense et homogène pour favoriser le frittage. Pour la mise en forme des poudres, nous avons utilisés deux méthodes : le pressage isostatique à froid et le pressage uni axial.

➤ ***Pressage isostatique :***

Cette méthode consiste à appliquer une pression uniforme à froid sur un moule en plastique qui contient la poudre sans liant organique. La poudre est versé dans des moules en silicone. Le moule fermé puis scellé sous vide dans un sachet en plastique est introduit dans l'enceinte de la presse remplis d'huile (*Figure. II.24*), une pression de 2500 bars est appliquée pendant 5minutes, les échantillons prennent alors les formes des barreaux cylindriques. Cette méthode permet d'augmenter la densité à cru des échantillons.

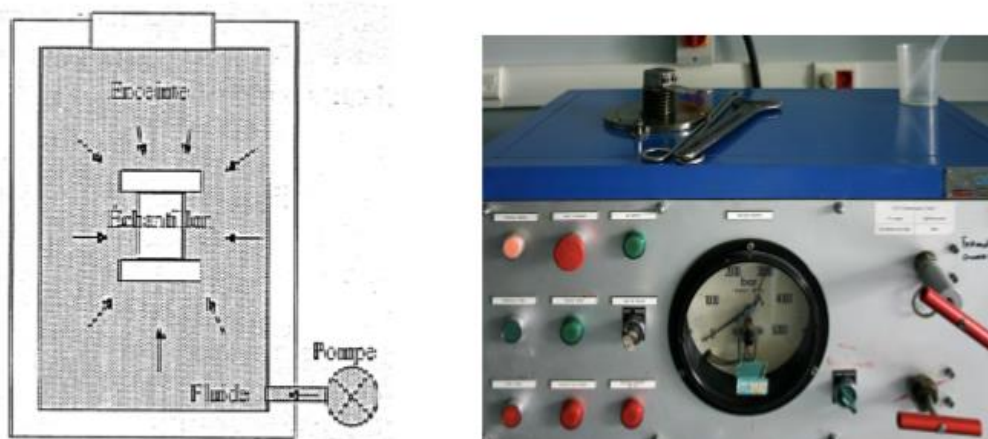


Figure II.24: Schéma de principe d'un pressage isostatique et photo de la presse.

➤ **Pressage uni axial :**

Dans cette méthode, la poudre insérée dans un moule cylindrique en acier, qu'on place dans une presse hydraulique est soumise à une pression constante exercée par l'intermédiaire d'un piston mobile (*Figure II.25*) [50].

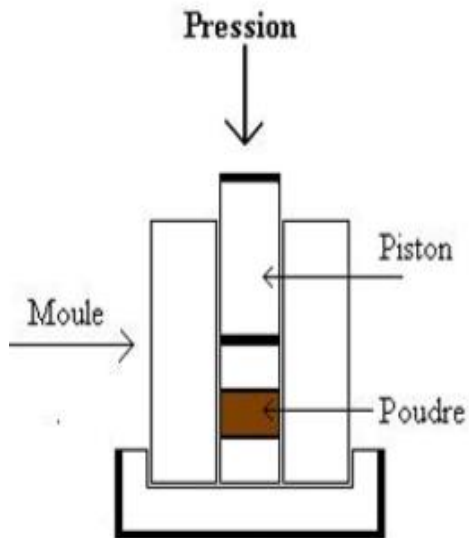


Figure II.25.: Illustration et image de la presse unie axial à froid utilisée pour le compactage de la poudre.



Figure II.26: Moule de pressage [51].

II-1 - 4 - 3 - Frittage :

Le frittage permet de transformer la poudre compactée en une masse solide dense ou poreuse et cohérente sous l'action de la chaleur. Il est largement utilisé pour améliorer la qualité de la poudre compactée. Ce traitement présente l'étape essentielle du processus d'élaboration des céramiques et se fait de la même manière que le cycle de calcination. Les pastilles ont été frittées à une température de 1100°C pendant quatre (04) heures dans un four à moufle type Kejia KJ-1800-81C. La vitesse de montée en température est de 10°C/min (**Figure II.27**). Les pastilles frittées (**Figure II.28**) des poudres broyées pendant 6 h et 18 h sont appelées pastille 6 h et pastille 18 h, respectivement [52].

Les deux types de frittage les plus utilisés [53] sont:

- Frittage en phase solide (conventionnel) : lorsqu'il n'y a pas fusion, ce sont alors uniquement les défauts ponctuels qui interviennent.
- Frittage en phase liquide : lorsqu'une partie de la matière atteint la fusion, on a alors des phénomènes de viscosité et de mouillabilité qui entrent en jeu.

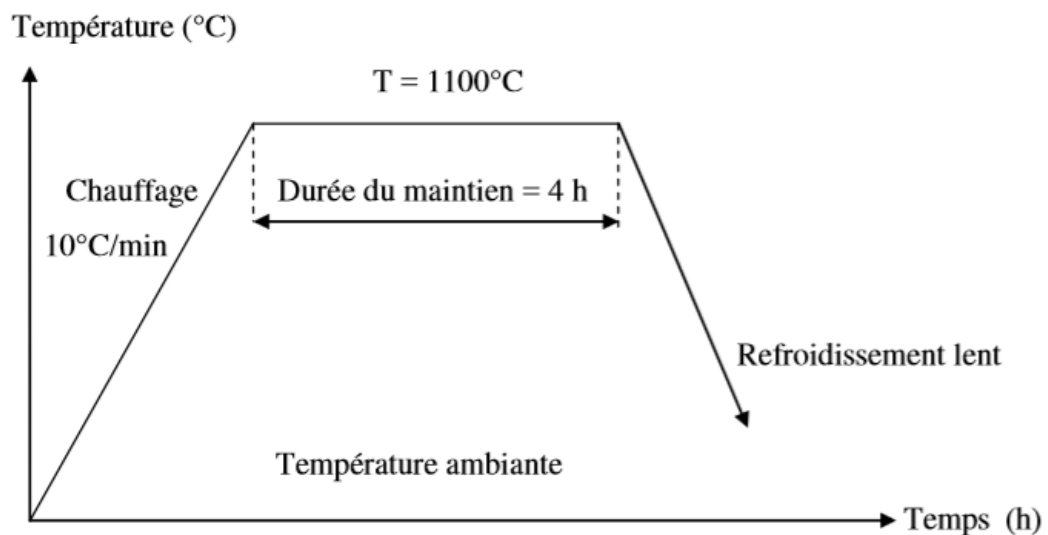


Figure II.27: Cycle de traitement de frittage des pastilles.

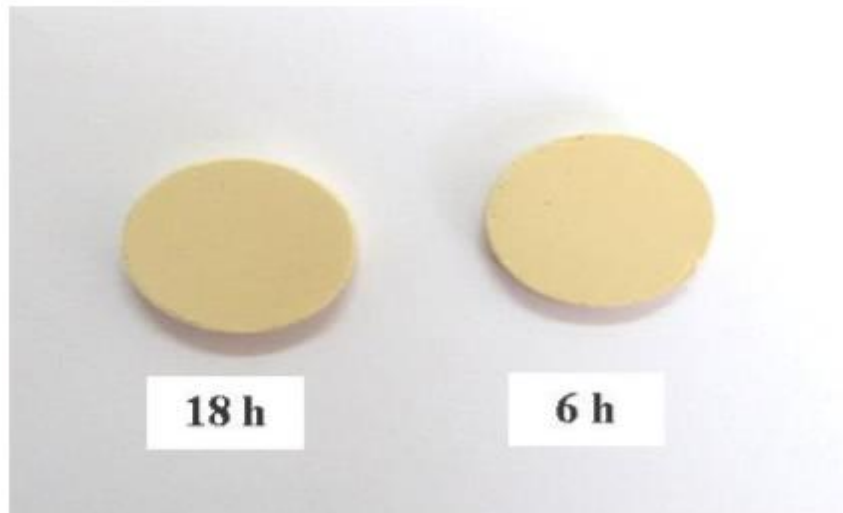


Figure II.28: Pastilles 6h et 18h [54].

II-1 - 4 - 4 - Découpe et rectification :

A l'issue du frittage, les barreaux cylindriques ont été découpés à l'aide d'une scie circulaire équipé d'un disque diamanté de précision. Les pastilles ainsi obtenues se présentent sous la forme de disques de 8 mm de diamètre et une épaisseur d'environ 1 mm. Ces dernières sont enfin polies pour éliminer les éventuelles traces de découpe.

II-1 - 5 - Domaines d'utilisation des céramiques:

a) Industrie électrique :

Les céramiques sont d'excellents isolants électriques, en raison de leur résistivité électrique élevée. La fabrication d'isolateurs électriques a longtemps été l'une de la principale utilisation des céramiques.

b) Industrie électronique :

Les céramiques sont utilisées comme condensateurs. Le matériau de base est souvent le titanate de baryum **BaTiO₃** dont les propriétés d'usage sont ajustées par ajouts d'aditifs, comme les zirconates ou d'autres titanates. De même les céramiques sont utilisées comme supports de circuits électroniques à cause de leur caractère isolant et leur pouvoir de dissipation thermique. Les substrats et boîtiers sont essentiellement fabriqués en alumine **Al₂O₃**. Pour les circuits électroniques à très forte intégration, l'alumine est remplacée par le nitrure d'aluminium afin d'obtenir une plus grande dissipation thermique.

c) Matériaux piézoélectriques :

Certaines céramiques sont utilisées comme matériaux piézoélectriques afin de produire des champs de surfaces (source d'étincelle, allumez de gaz,..). En effet, sous l'effet d'une contrainte mécanique, elles développent une différence de potentiel à leurs extrémités. Ces céramiques sont à base de quartz ou des titano zirconates de plomb dénommées céramiques PZT [55-56].

II - 2 Les métaux :

II- 2-1 Définition :

Les éléments chimiques capables de conduire l'électricité et la chaleur, qui présentent une luminosité caractéristique et qui, à l'exception du mercure, sont solides à la température normale.

Le concept est utilisé pour désigner des éléments purs ou des alliages ayant des caractéristiques métalliques. Parmi les différences avec les non-métaux, il y a lieu de mentionner que les métaux ont une faible énergie d'ionisation ainsi qu'une faible électronégativité [57].

II-2 - 2 Propriétés caractéristiques des métaux :

Parmi les 106 éléments du tableau périodique 76 sont des métaux. Les métaux se distinguent des autres éléments par plusieurs caractéristiques.

- Conductibilité thermique et électrique élevée due aux électrons libres qui se déplacent dans le champ potentiel du réseau.
- Coefficient de température de résistivité positif, cela signifie que la résistivité de métaux purs s'accroît avec l'élévation de la température ; à très basse température un grand nombre de métaux. (30) passent à l'état supra-conducteur à l'approche du zéro absolu, la résistivité de ces métaux tombe par sauts jusqu'à une valeur très faible.
- Emission thermo-électrique c'est-à-dire l'aptitude d'émettre des électrons sous l'effet de la température.
- Bonne aptitude à la réflexion ; les métaux sont opaques et ont un éclat métallique particulier. . Capacité élevée à la déformation plastique, due à la périodicité de leur structure

Chapitre II: Etude structurale céramique- métaux et des alliages.

atomique, lorsque certains volumes du métal se déplacent par rapport à d'autres volumes, la liaison entre les atomes ne se rompt pas.

- Tous les métaux et alliages métalliques ont la structure cristalline, l'arrangement de leurs atomes (ions) est régulier et périodique à la différence des corps amorphes dont les atomes sont disposés d'une manière chaotique. Donc toutes ces propriétés caractérisant l'état métallique, qui est caractérisé par l'énergie élevée de la liaison entre les atomes. La mesure de cette liaison est donnée par l'intensité de la chaleur de sublimation, thermique qui traduit l'énergie totale nécessaire pour passer d'un système condensé, c'est-à-dire d'un métal solide, à l'état de vapeur, lorsque les atomes isolés ne sont plus liés entre eux par l'énergie d'ionisation dans ce dernier cas les atomes étant électriquement neutres. A l'état structural ordinaire, les métaux purs ont une résistance faible et, dans de nombreux cas, n'assurent pas les propriétés physico-chimiques et technologiques requises. C'est ce qui définit leur utilisation relativement rare et la grande extension des alliages élaborés par fusion ou frittage de deux ou plus de métaux avec des métalloïdes. Leurs propriétés caractéristiques sont celles de l'état métallique. Les éléments chimiques constitutifs des alliages s'appellent composants. Un alliage peut avoir deux composants et plus binaire, ternaire etc... Pour étudier la structure, les transformations et les propriétés des métaux et alliages on introduit la notion de phase et de structure largement appliqués dans la métallographie. L'ensemble des phases à l'état d'équilibre s'appelle système. On appelle phase les parties homogènes d'un système ayant la même composition, le même état d'agrégation et qui sont délimitées par rapport aux autres parties par les surfaces de séparation ou interfaces. Ainsi un métal pur homogène ou un alliage est un système à phase unique. L'existence simultanée d'un alliage liquide (métal) et des cristaux constitue un système de deux phases. Par le terme de structure on entend la forme, les dimensions et la disposition des phases. On appelle composants structuraux d'un alliage ses parties isolées qui ont la même structure caractérisée par les propriétés qui leur sont propres [58].

II-2 - 3 Solidification des métaux :

a- Formation des grains et joints de grains :

La plupart du temps, lorsqu'un matériau solidifie, de nombreux cristaux se forment dans le liquide et un solide poly cristallin (plusieurs cristaux) se forme. Le moment où le cristal commence à croître est appelé nucléation et le point où il se produit le point de nucléation.

A la température de solidification, les atomes du liquide, commencent à se lier entre eux aux points de nucléation et à former des cristaux (*Figure II.29*). Très souvent, la solidification est initiée par la présence d'impuretés dans le liquide. Lorsque la température diminue, les atomes vont se déposer sur les impuretés et le cristal va commencer à se former. Ce processus est appelé nucléation hétérogène.

Les tailles finales individuelles des cristaux dépendent du nombre de points de nucléation. La taille des cristaux augmente par l'addition progressive d'atomes et croisse jusqu'à ce qu'il touche le cristal voisin en formation (*Figure II.29*).

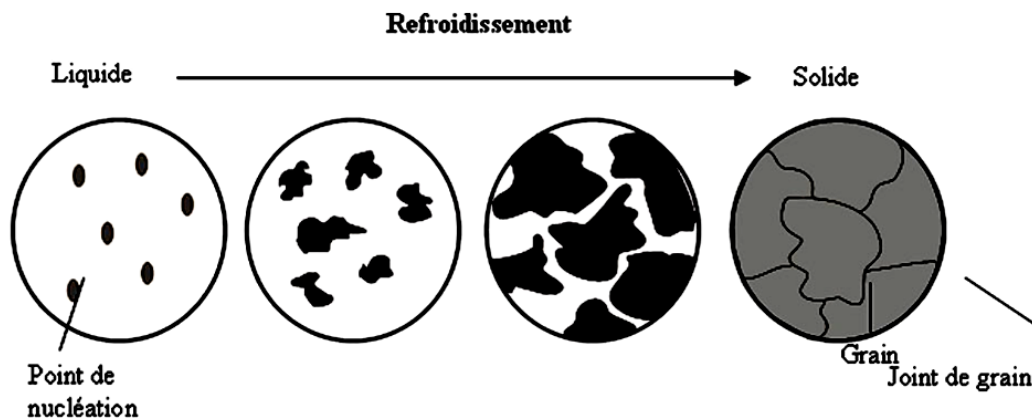


Figure II.29 : Solidification d'un métal par nucléation hétérogène.

Le cristal est appelé grain et les joints entre les cristaux, joints de grains. La zone du joint de grain est formée d'atomes qui n'ont pas de structure cristalline (zone désordonnée).

Un refroidissement rapide ou la présence d'un plus grand nombre d'impuretés (on peut en ajouter volontairement) résultera en un plus grand nombre de points de nucléation et par conséquent, de grains de plus petites tailles (structure à grains fins). Un refroidissement lent résultera généralement en des grains plus grands.

b- Dendrites

Dans les métaux, les cristaux se formant lors du refroidissement suivent généralement un schéma de solidification qui consiste en une branche principale et de multiples ramifications. Le cristal ressemble à un pin et est appelé dendrite (*Figure II.30*). La forme dendritique apparaît parce que les cristaux croissent selon des plans définis suite au treillis qu'ils créent [59].

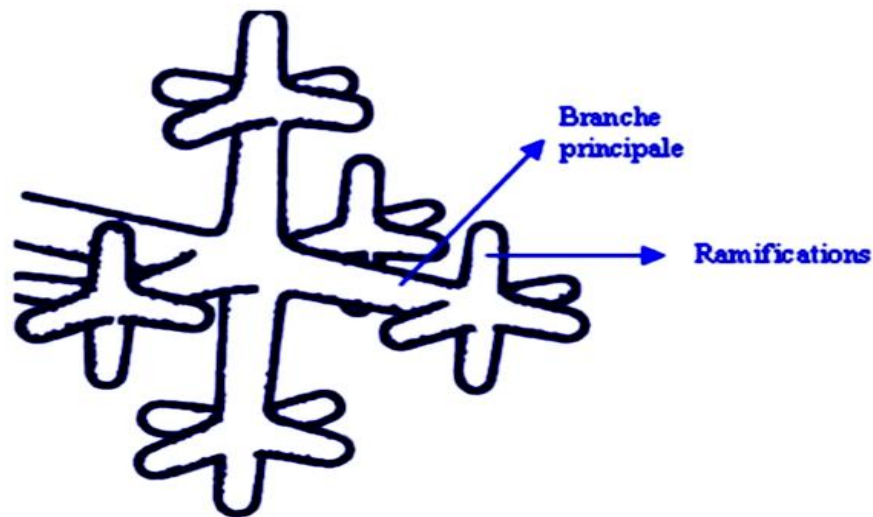


Figure II.29 : Représentation schématique d'une dendrite.

II - 2 - Les alliages :

II - 2 -1 Définition d'un alliage :

Un alliage est une combinaison d'un métal avec un ou plusieurs autres éléments. Le métal pur a des caractéristiques mécaniques relativement faibles, le fait d'ajouter d'autres éléments permet d'augmenter les caractéristiques mécaniques ou de modifier les caractéristiques chimiques des métaux, ou améliorer d'autres caractéristiques facilitant la mise en œuvre.

II - 2 -2 Alliage hétérogène :

Lorsque dans un alliage la teneur en élément d'alliage augmente, on peut avoir formation de deux phases, une phase contenant peu de l'élément d'alliage, et une phase dont la teneur est forte en élément d'alliage. Les cristallites à forte teneur en élément d'alliage sont appelées précipités (*Figure II-30*) [60].

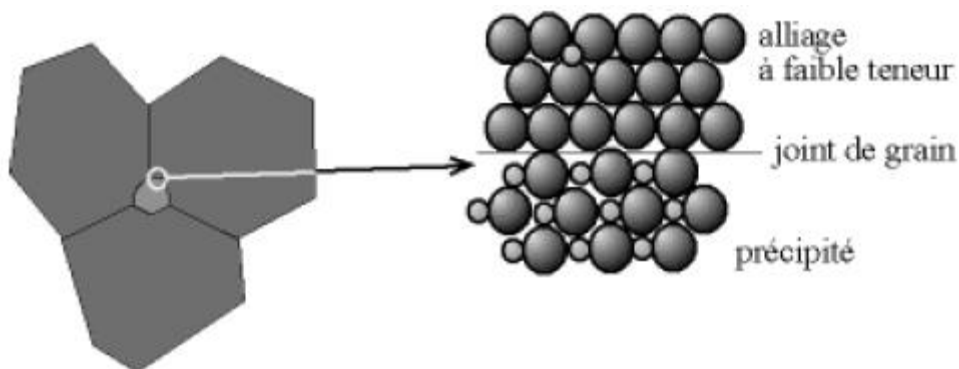


Figure II-30 : Représentation des précipités.

II - 2 -3 Structure cristallin des alliages :

II - 2 -3-1 Définitions :

Les solutions solides sont les mélanges monophasés (homogènes) de l'un des deux constituants principaux **A** et **B** pour une solution solide binaire, le terme solvant est associé au constituant le plus abondant et le terme soluté au constituant le moins abondant.

Il est difficile de prévoir l'allure d'un diagramme d'équilibre de phase d'un système d'alliages quel que soit la nature du mélange, qu'il soit simple pour les alliages binaires ou compliqué pour les alliages ternaires et plus.

II - 2 -3-2 Solutions solides de substitution et d'insertion :

On peut cependant classer les solutions solides en deux catégories et qui sont les solutions interstitielles et les solutions par substitution [61-62].

a- Solutions solides d'insertion :

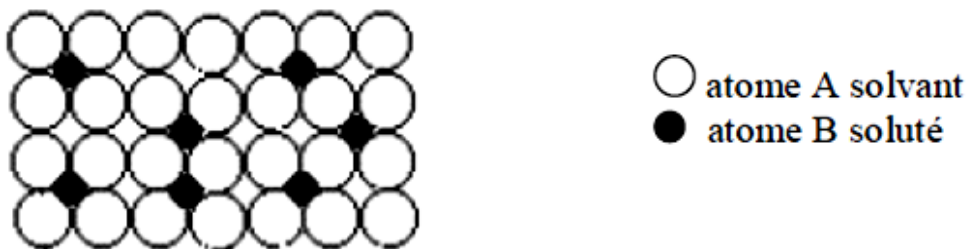


Figure II-31 : Solution solide d'insertion

Dans le premier cas (**Figure II-31**), les atomes d'un soluté **B** viennent s'installer dans les interstices, les cavités disponibles entre les atomes du solvant **A**. Ces solutions ne sont possibles que si le diamètre des atomes **B** est très inférieur à celui des cavités disponibles dans le réseau cristallin du solvant **A**. En général, les atomes **B** ont un diamètre beaucoup plus petit que ceux de **A**. Les solutions solides d'insertion les plus connues sont formées avec l'hydrogène, le bore, le carbone, l'azote et l'oxygène dissous dans les métaux.

b- Solutions solides de substitution

Dans ce second cas, les atomes **B** viennent prendre la place des atomes **A**, on dit que les atomes B viennent substituer les atomes A dans le réseau cristallin (*Figure II-32*).

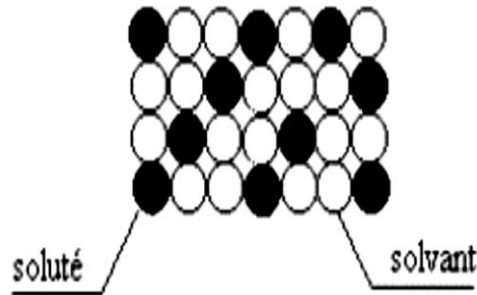


Figure II-32 : Solution solide de substitution.

Chapitre III :

Les liaisons chimiques-physiques.

Introduction :

La liaison s'établit entre atomes pour leur permettre d'adopter la configuration électronique du gaz rare Et respecter ainsi la règle de l'octet.

Les liaisons se classent en différents types [63].

I- Les liaisons chimiques :

- 1- La liaison covalente.
- 2- La liaison ionique.
- 3- La liaison métallique.

II- Les liaisons physiques :

- 1- La liaison hydrogènes.
- 2- L'interaction de Van der Waals

I- Les liaisons chimiques :**1)- Définitions :**

La liaison chimique représente un lien qui existe entre les électrons de la couche externe des atomes pour former des orbitales moléculaires à partir des orbitales atomiques. Cette liaison résulte d'un recouvrement soit axial ou latéral.

Les atomes sont liés par trois types de liaisons chimiques qui affectent le comportement chimique des matériaux, et le type de liaisons entre les atomes dépend de la structure électronique de l'atome [64].

2)- Différents types des liaisons chimiques :**Règle de l'octet :**

En chimie, le chiffre 8 est le symbole de la stabilité puisqu'il faut huit électrons pour combler un niveau électronique. Deux électrons dans l'orbitale s et six électrons dans l'orbitale p. Les atomes tenteront donc d'adopter la configuration électronique stable du gaz rare le plus près, et donc d'acquérir l'octet sur la couche de valence. Il existe des exceptions lorsqu'on atteint les éléments des périodes plus élevées et où il y a la présence d'orbitales d.

L'atome qui cède ses électrons devient un cation.

L'atome qui capte des électrons devient un anion [65].

2.1 - Liaison ionique :

Résulte de l'attraction électrostatique entre ions de signes contraire (cations Et ions). En général, la liaison ionique s'établit entre les atomes métalliques donneurs d'électrons des familles *IA*, *IIA* et *IIIA* et les atomes non métalliques accepteurs d'électron des familles *VIA* et *VIIA*.

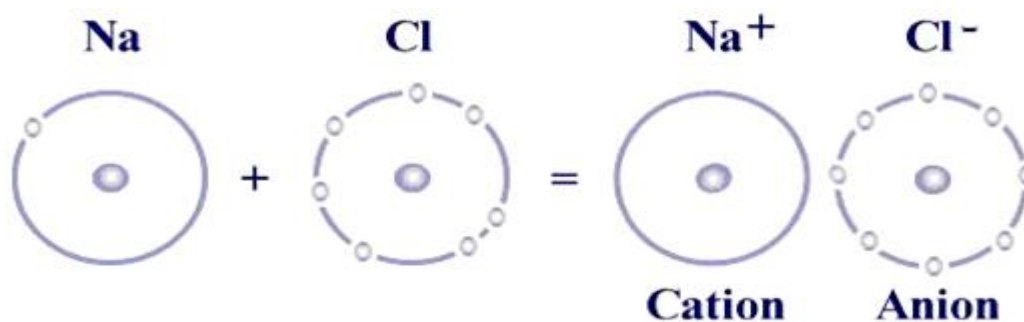


Figure III.33 : Liaison ionique – NaCl.

2.2 - Liaison covalente :

Une liaison covalente est une liaison chimique dans laquelle chacun des atomes liés met en commun un électron d'une de ses couches externes afin de former un doublet d'électrons liant les deux atomes. C'est une des forces qui produit l'attraction mutuelle entre atomes.

La liaison covalente implique généralement le partage équitable d'une seule paire d'électrons appelé doublet liant chacun des atomes fournissant un électron. La paire d'électron est délocalisée entre les deux atomes.

Le partage de deux ou trois paires d'électrons s'appelle « liaison double » ou liaison triple. On distingue trois types de liaisons covalentes :

a- Liaison covalente polaire : $0.4 < \Delta E_n < 1.7$

- Résulte de la mise en commun de 2 électrons célibataires (covalents) entre 2 atomes d'électronégativité différente (polarisée).
- Répartition non symétrique du nuage électronique.

✓ *Exemple* : HCl.

Hydrogène : H• $\chi = 2.1$

Chlore : Cl• $\chi = 3.00$

HCl \rightarrow H• •Cl \rightarrow H Cl

b- Liaison covalente non polaire (parfaite) :

- Molécules formées par des atomes de même espèce.
- Différence d'électronégativité $\Delta E_n \leq 0.4$
- Répartition symétrique du nuage électronique assurant la liaison covalente.
- Attraction égale des électrons vers les noyaux des 2 atomes.

✓ *Exemple :*



Figure III.34 : Liaison covalente - H₂

c- Liaison covalente de coordination (ou dative) :

Résulte de la mise en commun d'une paire d'électrons (covalents) entre 2 atomes d'électronégativités différentes. L'atome le moins électronégatif donne une paire d'électrons. De telles liaisons se rencontrent dans les molécules possédant un donneur (**charge +**) et un récepteur (**charge -**) de doublet de valence [66].

2.3- La liaison métallique

La liaison métallique concerne des atomes possédant un faible nombre d'électrons sur la couche externe, situation rencontrée dans le cas des métaux. Ces électrons sont faiblement liés au noyau et ils peuvent facilement en être arrachés. Les atomes sont alors transformés en ions positifs. Les électrons arrachés aux atomes sont mis en commun entre tous ces atomes.

Ils constituent un « nuage » ou « gaz » électronique qui assure la cohésion de l'ensemble (Figure III.35). Tous ces atomes ont perdu au moins un électron. Comme le cristal est neutre (ils restent dans le cristal, ils ne peuvent pas en sortir sinon le cristal devient positif et attire les électrons).

La liaison métallique est donc un ensemble d'ions positifs. Chaque charge positive est entourée par une charge négative [67].

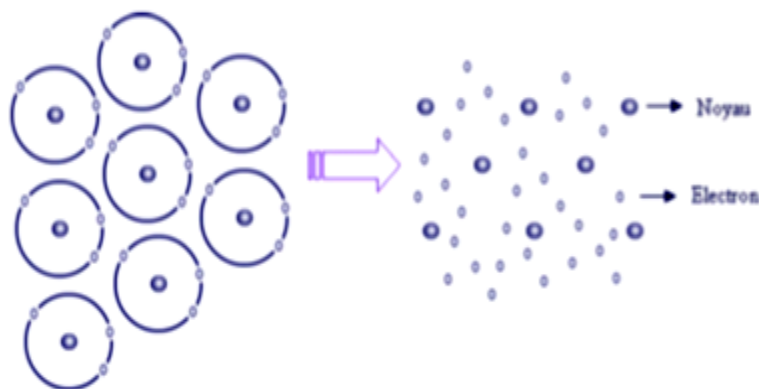


Figure III.35 : Représentation schématique de la liaison métallique.

II- Les liaisons physiques :

Il existe deux types de liaisons physique : les liaisons type Van der Waals et les liaisons hydrogène.

II-1- Liaisons de type Van Der Waals :

Les interactions entre molécules neutres se forment à partir d'interactions électrostatiques entre dipôles permanents, instantanés ou induits. Ces forces sont responsables d'interactions multiples entre atomes voisins non liés et sont appelées communément force de Van der Waals. On distingue trois types d'interactions: les forces de dispersion de London, les interactions de Debye et les effets de Keesom [68].

II.1.1- Les forces de dispersion de London : elles sont générées lorsqu'il y a, dans un premier temps, une déformation soudaine du nuage électronique formant un dipôle instantané ; résultat du mouvement aléatoire des électrons. Il s'ensuit une induction dans une seconde molécule située à proximité et apparition alors d'un dipôle induit, puis une interaction stabilisante entre ces deux molécules polarisées est établie.

Les forces de dispersion de London existent entre toutes les molécules non polaires et polaires [69]. En effet, dans le cas des molécules polaires, le mouvement aléatoire des électrons peut engendrer la formation d'un dipôle instantané qui s'ajoute au dipôle permanent. L'importance de ces forces de dispersion dépend en fait de la polarisabilité de la molécule qui augmente avec le nombre d'électrons.

II.1.2- Les interactions de Debye : elles sont très similaires aux forces de dispersion de London. Par contre l'induction ne sera pas créée par un dipôle instantané, mais plutôt par un dipôle permanent d'une molécule polaire.

II.1.2- Les effets de Kessom : ce type d'interaction s'établit lorsque deux dipôles permanents (deux molécules polaires) interagissent entre eux par des forces électrostatiques.

II.2- Liaisons Hydrogène :

La liaison hydrogène est une interaction attractive intra ou intermoléculaire entre un atome d'hydrogène lié de façon covalente à un atome donneur fortement électronégatif tels que l'azote, l'oxygène et le fluor, et un atome accepteur similaire faisant partie ou non de la même molécule que celle du donneur. La longueur de la liaison hydrogène est définie comme la distance entre les centres de ces deux atomes. Il s'agit d'une attraction électrostatique, favorisée aussi par le fait que l'atome d'hydrogène est petit et qu'il peut se rapprocher beaucoup du doublet non-participant de l'atome électronégatif (**figure 36**) [71-72].

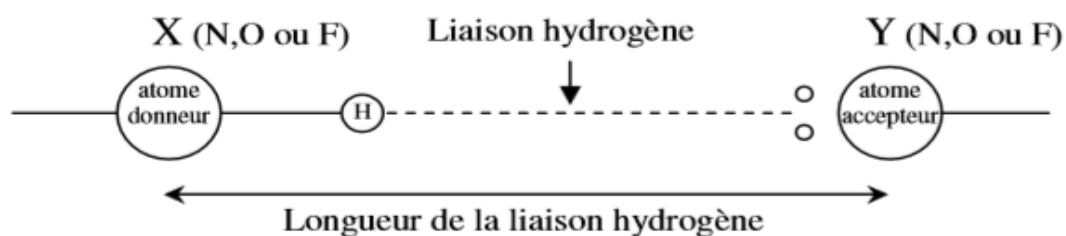


Figure III.36 : Représentation schématique de La liaison hydrogène.

La liaison hydrogène est notée **D-H...A** ou **D** est l'atome donneur et **A** est l'atome accepteur. En générale, une liaison hydrogène à une énergie de liaison de **2-60 KJ/mol**. L'énergie de la liaison hydrogène est maximal lorsque les trois atomes impliqués **X-H...Y** sont alignés. Les liaisons hydrogène sont souvent intermoléculaires [73-74], elles peuvent être aussi intramoléculaires [75] .si la nature des atomes et la géométrie de la molécule le permettent (**Figure 37**).

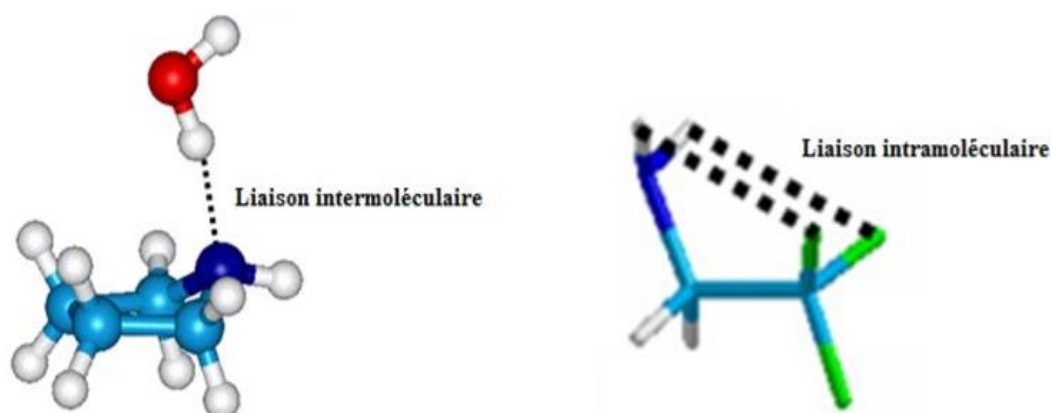


Figure III.37 : Liaison hydrogène intermoléculaire et intramoléculaire.

La liaison hydrogène joue un rôle primordial dans de nombreux phénomènes et propriétés physiques, chimiques [76-77] et biologiques [78] au niveau moléculaire (**Figure 38**), ne serait-ce que par son implication dans les propriétés de l'eau qui est le solvant biologique universel. Elle détermine également la structure et les propriétés de beaucoup de molécules et macromolécules biologiques. La liaison hydrogène retient les différents segments d'une protéine, lui donnant ainsi sa forme et stabilise l'ADN en reliant les deux brins. C'est d'ailleurs lorsque **James D. Watson** et **Francis H. Crick** découvrirent que c'est la liaison hydrogène qui couple les bases azotés (couples adénine-thymine et cytosine-guanine), qu'ils se mirent sur la piste de la configuration en double hélice de l'ADN « Nous avons découvert le secret de la vie » [79]. Tout cela vaut quelquefois à la liaison hydrogène le nom de « liaison de la vie », tout comme l'eau est la « molécule de la vie » [80-81].

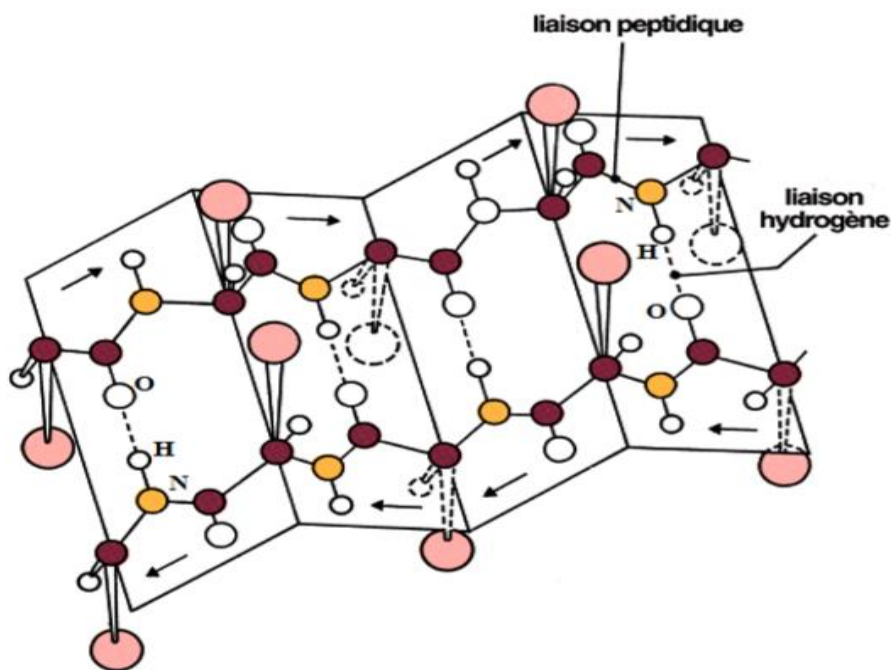


Figure III.38: Structure secondaire en feuille plissée bêta de la chaîne polypeptidique.

II.2.1- Les différents types de liaisons hydrogène :

Nous distinguons en général trois types de liaisons hydrogène (faible, modérée et forte) [82].

II.2.1.1- Liaisons hydrogène faibles avec des énergies de liaison inférieure à 15 kJ/mole :

Ces liaisons sont semblables aux forces de Van der Waals, où la distance entre les atomes est supérieure à 2.2 Å et l'angle que forme ces liens se situe entre 90° et 150°.

Les meilleurs exemples de ponts hydrogène faibles sont les dimères en phase gazeuse contenant certains acides faibles et les systèmes dans lesquels on retrouve des liens $C-H \cdots O/N$ et $O/N-H \cdots \pi$.

II.2.1.2- Liaisons hydrogène modérées avec des énergies entre 15-60 kJ/mole :

Ce type de liaisons se situe entre les deux extrêmes, elles sont caractérisées par une longueur de liens comprise entre **1.5** et **2.2 Å** et des angles de **130°** à **180°**.

Tous les acides carboxyliques, les alcools, les phénols et les protéines comprennent des liaisons hydrogènes moyennes.

II.2.1.2- Liaisons hydrogène fortes avec des énergies entre 60 et 160 kJ/mole :

Semblables aux liens covalents, les ponts hydrogène forts constituent des interactions plus rapprochées, soit de **1.2** à **1.5 Å**. Les angles que forment ces liens sont de **170° -180°** donc plus grands que ceux des liaisons faibles.

Les dimères « acides forts/bases fortes » en phase gazeuse et des complexes avec **HF** en sont de bons exemples.

II.2.2- Propriétés de la liaison hydrogène :

II.2.1.1- La distance entre l'atome donneur et l'atome accepteur :

La distance entre l'atome d'hydrogène et l'atome accepteur est bien plus petite que pour une liaison de Van Der Waals, les molécules se rapprochant beaucoup plus que ne le permet la somme des rayons de Van Der Waals. La distance entre l'atome donneur **D** et l'atome accepteur **A**, est alors approximativement égale à la somme des rayons de Van Der Waals des atomes **D** et **A**. La distance **H...O** est par exemple d'environ **1,9 Å** dans le complexe **N-H...O=C**, alors que la somme des rayons de Van Der Waals des atomes d'hydrogène et d'oxygène est de **2,6 Å**. La liaison covalente **H-O** est par contre d'environ **1,0 Å**. Dans les molécules biologiques les longueurs de liaisons hydrogène sont comprises entre **2,8** et **3,1 Å**

II.2.1.2- Directivité de la liaison :

L'angle de liaison est proche de **180°**, le proton pointe directement vers doublet électronique non liant de l'atome accepteur. Cette directionnalité est une conséquence des deux contributions attractives majeures électrostatique et le transfert de charge. Elle est d'une très grande importance dans la structure moléculaire de la glace, ou encore dans l'organisation des structures biologiques régulières telles que les protéines (**l'ADN**).

II.2.1.3- Processus coopératif :

La formation d'une liaison hydrogène entre deux molécules augmente la polarité de chacune d'elles. Cela a pour effet d'accroître la propriété d'autres atomes de la molécule, non encore engagés dans une liaison hydrogène, à être donneur ou accepteur de proton, et à favoriser ainsi la formation d'une deuxième liaison, et ainsi de suite.

II.2.2- Les différentes configurations de la liaison hydrogène :

II.2.1.1- Liaison hydrogène à deux centres :

La liaison hydrogène forte est presque linéaire avec un seul atome accepteur, elle est dite à deux centres (**Figure 39**) [83].

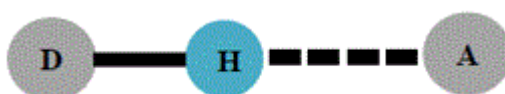


Figure III.39: Liaison hydrogène à deux centres.

II.2.1.2- Liaison hydrogène à trois centres :

On dit qu'une liaison hydrogène moyenne ou modérée est à trois centres, quand l'atome d'hydrogène est lié à trois atomes avec une liaison covalente et deux liaisons hydrogène. Ces trois atomes (D, A_1, A_2) se trouvent dans un plan où la somme des angles est approximativement de 360° ($\theta_1 + \theta_2 + \theta_3 \approx 360^\circ$). Les liaisons à trois centres sont usuellement non symétriques où $r_1 \neq r_2$ (**Figure 6**).

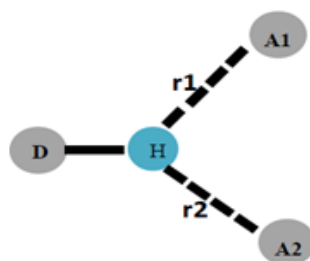


Figure III.40: Liaison hydrogène à trois centres.

II.2.1.2- Liaison hydrogène chélatées :

Une liaison hydrogène chélatée est une liaison à trois centres, où l'atome d'hydrogène est lié à trois atomes : un à partir d'une liaison covalente et deux par deux liaisons hydrogène avec deux atomes accepteurs qui sont liés au même atome X (**Figure 41a**), la figure 41b

présente aussi une liaison hydrogène chélatée, dans ce cas les deux liaisons hydrogène sont à deux centres.

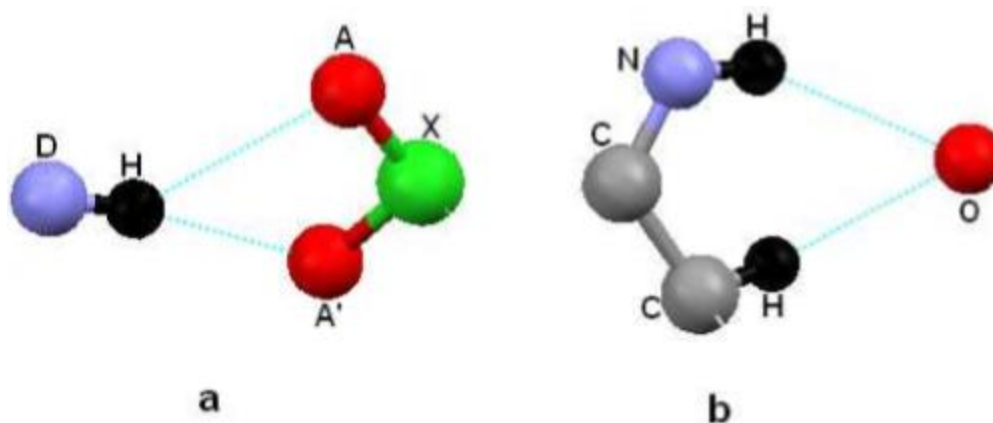


Figure III.41: Liaison hydrogène chélatée.

II.2.1.3- Liaison hydrogène bifurquée :

La combinaison de deux configurations à trois centres conduit à une configuration bifurquée (Figure 42).

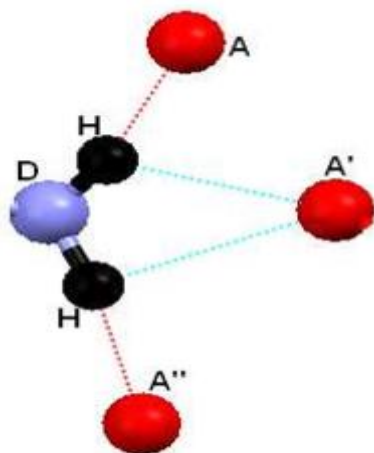


Figure III.42: Configuration bifurquée.

II.2.1.4- Liaison hydrogène à quatre centres :

Lorsque l'atome d'hydrogène établit trois liaisons hydrogène avec trois atomes accepteurs différents, cette configuration est dite liaison hydrogène à quatre centres (Figure 43). Ce type de liaison hydrogène est rarement observé dans les structures cristallines (1%). Les distances

$H...A$ sont plus longues que celle observée dans les liaisons hydrogène à trois centres et la somme des angles $D-H...A$, doit être supérieur à 90° .

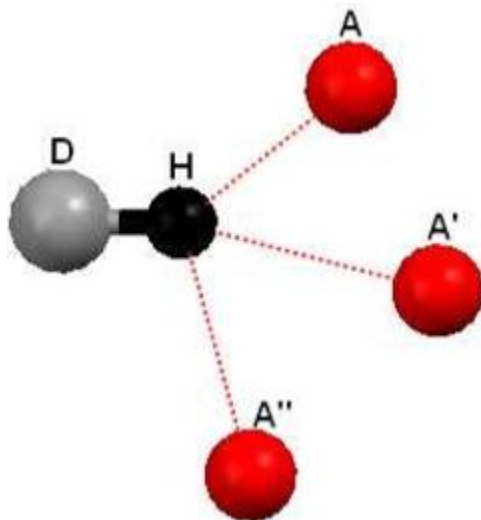


Figure III.43: Liaison hydrogène à quatre centres.

II.2.1.4- Liaison hydrogène Tandem :

La liaison hydrogène tandem (Figure 44) est surtout observée dans la structure de la molécule d'eau où les atomes d'hydrogène sont désordonnés.

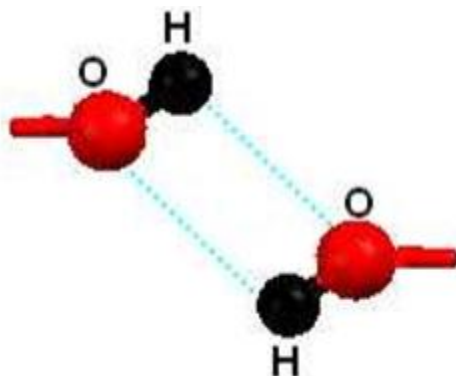


Figure III.44: Liaison hydrogène Tandem.

Conclusion générale

Dans le premier chapitre de ce mémoire nous avons parlé de manière explicite sur l'arrangement structural des solides cristallins. Tous les matériaux qui nous entourent sont formés d'atomes et de molécules. L'arrangement et la relation qui existent entre ceux-ci expliquent certaines de leurs propriétés. Pendant longtemps les physiciens, en se fondant sur l'apparence immédiate des corps (cf. glossaire) qui nous entourent, ont distingué les états solide, liquide et gazeux. La classification actuelle repose sur la structure atomique des matériaux et ne considère plus que deux états principaux : l'état désordonné et l'état ordonné (**Figure**).

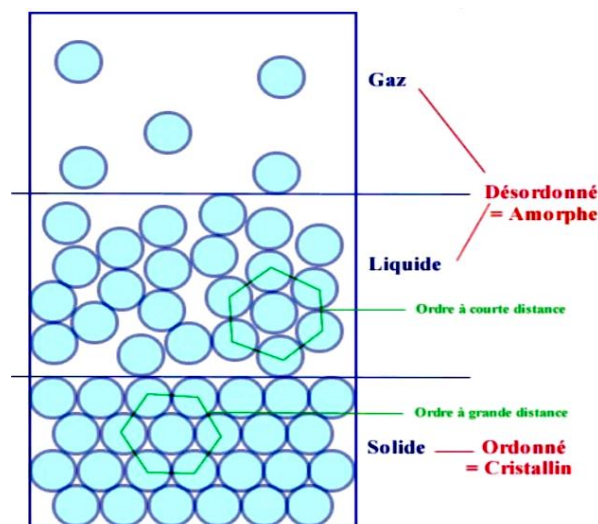


Figure : Etat désordonné (amorphe) du gaz et des liquides. Etat ordonné (cristallin) des solides à l'exception des verres et de certains polymères.

Le plus souvent, en revanche, les matériaux cristallins sont des agrégats d'une multitude de cristaux parfois très petits (de quelques microns à quelques centaines de microns). Dans ces poly cristaux, le caractère ordonné de la matière, présent à l'échelle de chaque cristal, n'apparaît plus au niveau macroscopique. Les métaux et les alliages métalliques relèvent de cette description, de même que les céramiques et certains polymères partiellement cristallins. Dans le cas des métaux, les cristaux de l'agrégat sont appelés grains et les frontières entre ces cristaux joints de grains (Arrangement structural des solides cristallins).

La disposition des atomes ou des groupes d'atomes dans un solide cristallin, c'est-à-dire la Structure cristalline de l'ensemble, dépend de plusieurs facteurs, en particulier du type de liaison entre les atomes (Les liaisons atomiques) et du nombre de premiers voisins, ou nombre de coordinence, que chaque atome peut accepter. L'assemblage métal-céramique est aujourd'hui une technique couramment utilisée dans plusieurs domaines tels que : Electricité, Electrotechnique, Mécanique, aéronautique, Nucléaire, Biomédical, etc. Les procédés d'assemblage (brasage, thermo compression, dépôt par projections, méthode de la barbotine ...) ainsi que la nature des matériaux à unir diffèrent d'une application à une autre. Il est clair, que pour toute application le problème principal est la liaison métal-céramique. Par conséquent, une meilleure connaissance des mécanismes de liaison métal-céramique est essentielle pour appréhender la réalisation de liaisons adéquates.

Dans le troisième chapitre on a pu constater que les fonctions et liaisons chimiques sont nécessaires pour les interactions moléculaires. Ceci est derrière l'autoassociabilité des molécules et la tendance vers la formation de complexes. Parmi les liaisons chimiques, la liaison hydrogène joue un rôle important. On distingue les liaisons chimiques fortes ayant une énergie de liaison très élevée (supérieure à 100 kJ.mol^{-1}) et des liaisons chimiques faibles. Les liaisons ioniques, covalentes et métalliques sont des liaisons fortes. Les liaisons faibles sont représentées principalement la liaison de Van der Waals et la liaison hydrogène.

Références Bibliographiques :

[1] : William D. Callister, *Science et, Génie des matériaux*, 4, 336, 5e édition, Dunod, Canada, (2001).

[2] : S. BENSAAIDA *ELABORATION DES METAUX FERREUX (FONTES ET ACIERS)* p5.

[3]: Salim BOULKHESSAIM *Caractérisation microstructurale des alliages Al-Ti* UNIVERSITÉ BADJI MOKHTAR-ANNABA 2008.

[4] : Cours de A. RASKIN « *Rappels atomistiques, structure des métaux, des alliages et des céramiques* » 2009/2010 Société Francophone de Biomatériaux Dentaires, Université Médicale Virtuelle Francophone.

[5]: Dr : BOUKOUSSA Bouhadjar 'Structure des matériaux solides' CENTRE UNIVERSITAIRE D'AIN-TEMOUCHENT, « C.U.A.T » Année « 2014-2015 »

[6] : Mr. BELAHOUEL Mohamed 'METALLURGIE COURS ET EXERCICES CORRIGES' Université des Sciences et de la Technologie d'Oran Mohamed BOUDIAF 2016/2017.

[7] : Philippe L'ours, *Au cœur des matériaux cristallins*, Paris ; Presses des Mines, Collection Sciences de la matière, 2016

[8] : Dr. Hakima YAHY Polycopié de Cours Cristallographie UNIVERSITE 8 MAI 1945 GUELMA 2017

[9] : BENNOUI Oussama, 'Dénombrement des groupes spatiaux issus de la classe 4/m du système quadratique', Master, Uni. de M'sila, juin 2014

[10] : Dr. Hakima YAHY Polycopié de Cours Cristallographie UNIVERSITE 8 MAI 1945 GUELMA 2017

[11] : Francis Harry Compton Crick' *MODELE DU CRISTAL PARFAIT* Architecture de la matière Lycée F. BUISSON PTSI (1916-2004)

[12] : BENNOUI Oussama, 'Dénombrement des groupes spatiaux issus de la classe 4/m du système quadratique', Master, Uni. de M'sila, juin 2014

[13] : Dr. Hakima YAHY Polycopié de Cours Cristallographie UNIVERSITE 8 MAI 1945 GUELMA 2017

[14] : Francis Harry Compton Crick' *MODELE DU CRISTAL PARFAIT* Architecture de la matière Lycée F. BUISSON PTSI (1916-2004)

[15] : NAAMOUNE Soriya ' Dénombrement des groupes spatiaux issus de la classe 422 du système quadratique', Master UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA juin 2018.

- [16] : Dr. Hakima YAHY Polycopié de Cours Cristallographie UNIVERSITE 8 MAI 1945 GUELMA 2017
- [17] : Philippe L'ours, *Au cœur des matériaux cristallins*, Paris ; Presses des Mines, Collection Sciences de la matière, 2016
- [18] : NAAMOUNE Soriya ' Dénombrement des groupes spatiaux issus de la classe 422 du système quadratique ', Master UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA juin 2018.
- [19] : S. Bensaada Article · March Notions de cristallographie Université de Biskra 11 Octobre 2016
- [20] : NAAMOUNE Soriya ' Dénombrement des groupes spatiaux issus de la classe 422 du système quadratique ', Master UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA juin 2018.
- [21] : Cours de A. RASKIN « Rappels atomistiques, structure des métaux, des alliages et des céramiques » 2009/2010 Société Francophone de Biomatériaux Dentaires, Université Médicale Virtuelle Francophone.
- [22] : Abbas Belfar, *cours et exercices de cristallographie*, polycopié, USTO, 2014
- [23] : NAAMOUNE Soriya ' Dénombrement des groupes spatiaux issus de la classe 422 du système quadratique ', Master UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA juin 2018.
- [24] : Cours de A. RASKIN « Rappels atomistiques, structure des métaux, des alliages et des céramiques » 2009/2010 Société Francophone de Biomatériaux Dentaires, Université Médicale Virtuelle Francophone.
- [25] : Mr. BELAHOUEL Mohamed 'METALLURGIE COURS ET EXERCICES CORRIGES' Université des Sciences et de la Technologie d'Oran Mohamed BOUDIAF 2016/2017.
- [26] : DOUIN Joël, *Mécanique des milieux continus; Introduction à la plasticité des matériaux*, Edition Diderot – 1997
- [27] : Loyd, Lowell, *Plastic Déformation and Annealing of Metals*, ASM International, (1987)
- [28] : B. JACQUOT, *Propriétés mécaniques des Biomatériaux utilisés en Odontologie*, Société Francophone des Biomatériaux Dentaires (SFBD), 2010
- [29] : Mr. BELAHOUEL Mohamed 'METALLURGIE COURS ET EXERCICES CORRIGES' Université des Sciences et de la Technologie d'Oran Mohamed BOUDIAF 2016/2017.

[30] : Michael F. Ashby and David R. H. Jones, *matériaux, propriétés et applications*, DUNOD, Paris, 2008

[31] : Cours de A. RASKIN « Rappels atomistiques, structure des métaux, des alliages et des céramiques » 2009/2010 Société Francophone de Biomatériaux Dentaires, Université Médicale Virtuelle Francophone.

[32] : <http://deuns.chez.com/sciences/cristallo/defauts41.html>.

[33] : Mr. BELAHOUEL Mohamed 'METALLURGIE COURS ET EXERCICES CORRIGES' Université des Sciences et de la Technologie d'Oran Mohamed BOUDIAF 2016/2017.

[34] : Frédéric Momprou, *Arc, corde et tension de ligne*, Copyright 2017

[35] : Cours de A. RASKIN « Rappels atomistiques, structure des métaux, des alliages et des céramiques » 2009/2010 Société Francophone de Biomatériaux Dentaires, Université Médicale Virtuelle Francophone.

[36] : François Cardarelli. *Materials Handbook. A Concise Desktop Reference 2nd Edition*. Springer, London, New York (2000).

[37] : P. ARI- GUR and L. BENGUIGUI, *X-ray study of the PZT solid solutions near the morphotropic phase transitions*, *Solid State Communications*, Vol 15, N° 6, p 1077- 1079, (1974).

[38] : M. Bullo, « *Modélisation et commande du moteur piézoélectrique à onde progressive* », thèse de doctorat, école polytechnique fédérale de Lausanne, suisse (2005)

[39] : C. A. JOUENNE, *Traité de Céramique et De Matériaux Minéraux*. Ed .Septima Paris.p.100-120 (1990).

[40] : Michel W Barsoum. *Fundamentals of ceramics*.Series in Materials Science and Engineering, Institute of Physics Publishing, Bristol and Philadelphia.USA 2003

[41] : MAKRI HOCINE " ELABORATION D'UN COMPOSITE MULTIPHASES ZIRCON-ALUMINE-MULLITE-ZIRCONE" UNIVERSITE FERHAT ABBAS-SETIF UFAS.

[42] : V.M. Ferreira, F. Azough, R. Freer, J.L. Baptista, « *The effect of Cr and La on MgTiO₃ and MgTiO₃-CaTiO₃ microwave dielectric ceramics* », *J. Mater Res* 12 (1997) 3293-3299.

[43] : MAKRI HOCINE " ELABORATION D'UN COMPOSITE MULTIPHASES ZIRCON-ALUMINE-MULLITE-ZIRCON " UNIVERSITE FERHAT ABBAS-SETIF UFAS.

[44] : G.ALIPRANDI «Matériaux réfractaires et céramiques techniques » Ed. septima p : 109 (1979)

[45] : J. Curie, P. Curie « Développement par compression de l'électricité polaire dans les cristaux hémihédres à faces inclinées » Bulletin de minéralogie .3 (1880) 90-93.

[46] : ZIDI Naima "RECHERCHE DE NOUVELLES COMPOSITIONS CERAMIQUES PIEZOELECTRIQUES PERFORMANTES EXEMPTES DE PLOMB " THESE DE DOCTORAT UNIVERSITE MOULOUD MAMMERI DE TIZI-OUZOU 2016

[47] : J. Curie, P. Curie « Développement par compression de l'électricité polaire dans les cristaux hémihédres à faces inclinées » Bulletin de minéralogie .3 (1880) 90-93.

[48] : Alima MEBREK "Elaboration et caractérisation de céramiques ZnO–TiO₂ " THÈSE DOCTORAT EN SCIENCES UNIVERSITÉ BADJI MOKHTAR ANNABA (2018).

[49] : Fares KAHOU, Elaboration et caractérisation de céramiques PZT dopé et détermination de la frontière morphotropique (FMP), thèse de doctorat, Université Mohamed Khider – Biskra, (2013).

[50] : ZIDI Naima "RECHERCHE DE NOUVELLES COMPOSITIONS CERAMIQUES PIEZOELECTRIQUES PERFORMANTES EXEMPTES DE PLOMB " THESE DE DOCTORAT UNIVERSITE MOULOUD MAMMERI DE TIZI-OUZOU 2016

[51] : Fares KAHOU, Elaboration et caractérisation de céramiques PZT dopé et détermination de la frontière morphotropique (FMP), thèse de doctorat, Université Mohamed Khider – Biskra, (2013).

[52] : Belghalem, H., Bonnefont, G., & Fantozzi, G. (2014). Caractérisation d'une alumine frittée par frittage naturel et SPS. Verres, Céramiques & composites, 3(1).

[53] : DJELLALI BRAHIM " ELABORATION ET CARACTERISATION D'UNE CERAMIQUE DIELECTRIQUE A BASE DE PLYGORSKITE" Thèse de MASTER UNIVERSITE M'HAMED BOUGARA-BOUMERDES

- [54] : Belghalem, H., Bonnefont, G., & Fantozzi, G. (2014). *Caractérisation d'une alumine frittée par frittage naturel et SPS. Verres, Céramiques & composites*, 3(1).
- [55] : G.ALIPRANDI «*Matériaux Réfractaires et Céramiques Techniques* » Ed .septima p:443459(1979)
- [56] : J.PHILIBERT «*Recueil de Communication* » *Deuxième Séminaire Des Sciences Des matériaux, université de Constantine*, p.2-16 (1985)
- [57] : <https://lesdefinitions.fr/métaux>
- [58] : S.BENSAADA ELABORATION DES METAUX FERREUX (FONTES ET ACIERS)
- [59] : *Cours de A. RASKIN « Rappels atomistiques, structure des métaux, des alliages et des céramiques» 2009/2010 Société Francophone de Biomatériaux Dentaires, Université Médicale Virtuelle Francophone.*
- [60] : *Handbook ASM International, Alloy Phase Diagrams, Volume 3 (1992), p. 29.*
- [61] : J. Barralis, G.maeder, *Précis de métallurgie, Elaboration, structure et propriétés et Normalisation*, NATHAN (1983).
- [62] : M. Draissia, M.Y. Debili, *European Central Journal of Physics*, 3 (3) (2005), p. 395.
- [63] : R. Ouahes, B. Devallez, *Chimie Générale, O.P.U. Alger (1988).*
- [64] : <http://www.univ-sba.dz>
- [65] : H. B. Gray, *Les électrons et la liaison chimique, Inter Editions, Paris (1978).*
- [66] : <http://www.henni-mansour-zoubir.e-monsite.com>
- [67] : R. Ouahes, B. Devallez, *Chimie Générale, O.P.U. Alger (1988).*
- [68] : Paczkowska, M., Mizera, M., Powalowska, D.S., Lewandowska, K., Błaszczak, W., Gościańska.,J., Pietrzak, R., Cielecka-Piontek, J. , *J. Pharm. Biopharm*, 2016, 99,24.
- [69] : Mr. BELAHOUEL Mohamed '*METALLURGIE COURS ET EXERCICES CORRIGES*' *Université des Sciences et de la Technologie d'Oran Mohamed BOUDIAF 2016/2017.*

[70] : *The hydrogeri bond : an electrostatique interaction ?*, A.D.Buckingham, *Theoretical treatements of hydrogen bonding*, D.Hadzi Ed.(1997), 1-12.

[71] : *The hydrogeri bond : an electrostatique interaction ?*, A.D.Buckingham, *Theoretical treatements of hydrogen bonding*, D.Hadzi Ed.(1997), 1-12.

[72] : *Liaisons intermoléculaires*, A.Gerschel, *InterEditions/CNRS Editions*, (1995).

[73] : A.Anthony, G. R .Desiraju, R. K. R. Jetti, S. S.Kuduva, N. N. L .Madhavi,., A. Nangia, R.Thaimattam, et V.R.Thalladi. (1998). *Cryst. Engng. 1, Mater. Res. Bull. Suppl. S, 118.*

[74] : G.R. Desiraju. (1997). *Chem. Commun.* pp. 1475-1476.

[75] : R. Yamdagni, P. Kebarle, *J. Am. 1973. Chem. Soc.*, 95, 3504.

[76] : G. C. Pimentel, A. L. Mc Clellan, 1960. *The Hydrogen Bond*, Freeman, San Francisco

[77] : S. N. Vinogradov, R. H. Linnell, (1974). *Hydrogen Bonding*, M. Dekker, New York.

[78] : G. A. Jeffrey, W. Saenger,(1991). *Hydrogen Bonding in Biological Structures*, Springer – Verlag, Berlin.

[79] : J. D. Watson.Crick, F. H. C. (1953), *Nature 171*, 737 - 738

[80] : Mc Quarrie, Rock, *Chimie générale*, De Boeck Université, troisième édition (1992).

[81] : C.K.Mathews, K.E.Van Holde, K.G.Ahern, *Hardcover.Biochemistry*,troisième edition (2001).

[82] : Debnath,T., Saha, J.K., Banu,T., Ash, T., Das, A.K.: *St.,Theor. Chem*, 2016, *Acc*, 135, 1.

[83] : J. L. Wang, Z. Berkovitch Yellin, L. Leiserowitz. *Acta Cryst.* (1985). *B41*, 341-348

ملخص:

علم السيراميك يختص بدراسة خواص جميع المواد الصلبة الغير عضوية ما عدا المعادن والسبائك والتي نحصل عليها كمنتجات في درجات حرارية عالية لاستخدامها في تطبيقات مختلفة. يشمل السيراميك المواد المعدنية اللاعضوية المكونة للصخور والأطيان وتكون على شكل اكاسيد. تصنع بطريقة تكنولوجيا المساحيق لذلك تصنع المواد السيراميكية المنتجات السيراميكية

يبدأ من مساحيقها وليس من منصهراتها لان الحصول على منصهر من مادة سيراميكية صعب جداً وذلك لارتفاع درجة حرارة انصهار المواد السيراميكية (أكثر من 2000 درجة مئوية في أكثر الأحيان) ولصعوبة احتواء المنصهر السيراميكي في قالب درجة حرارة انصهاره محدودة.

Abstract :

The science of ceramics is concerned with studying the properties of all inorganic solids except for metals and alloys, which we obtain as products at high temperatures for use in different applications. Ceramics includes the inorganic mineral substances that make up rocks and mud and are in the form of oxides. Ceramic products are manufactured using powder technology, so the manufacture of ceramic materials starts from their powders and not from their fuses because obtaining a fuse from a ceramic material is very difficult due to the high melting temperature of ceramic materials (more than 2000 degrees Celsius in most cases) and the difficulty of containing the ceramic molten in the mold of its melting temperature Limited.