



MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE « Abbès LAGHROUR » DE KHENCHELA
FACULTE DES SCIENCES ET DE TECHNOLOGIE



Département de Génie Mécanique

N° de série :

Mémoire de fin d'études

Pour l'obtention du diplôme de Master (L.M.D)

Filière : Génie Mécanique

Spécialité : Génie des Matériaux

Etude du Comportement Structural et tribologique des biocéramiques

Réalisé par :

- *Brahmi Tahar*
- *Hattek Adel*

Membres de jury :

Mr . Khadraoui F	M.A.A	Université de khenchela	président
Mr. Bouali H	M.A.A	Université de khenchela	Examineur
Mr. Hannachi Bouzid	M.A.A	Université de khenchela	Rapporteur

Présenté le06/2022

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail

*Je dédie ce travail à mes très chers parents qui
m'ont Affectueusement soutenus tout le long de mes études
sans jamais faillir*

*A ma chère et tendre mère RAMDANA, source d'affectation de
courage et d'inspiration qui a autant sacrifié pour me voir
atteindre ce jour. À l'homme qui m'a toujours guidé vers le droit
chemin avec son amour ses sacrifices et encouragements son
soutien moral, À mon cher Père AMMAR « Oh Allah, aie pitié de
mon père »*

*A ma femme samia mesbahi et mes enfants « MOHAMED
LOUAI, KAISSER
, MOUAID BIALLAH ».*

A toute la famille BRAHMI.

*A toute la promo 2022, et à tous mes amis
de l'ENTP sans exception.*

A tous ceux que je porte dans mon cœur.

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail

*Je dédie ce travail à mes très chers parents qui
m'ont affectueusement soutenus tout le long de mes études
sans jamais faillir*

*A ma chère et tendre mère, source d'affectation de courage et
d'inspiration qui a autant sacrifié pour me voir atteindre ce jour.
À l'homme qui m'a toujours guidé vers le droit chemin avec son
amour ses sacrifices et encouragements son soutien moral, À
mon cher Père « Oh Allah, aie pitié de mon père ».*

*A ma femme dizi et mes enfants
« kaouather , chaher ; ilyas , yaser ,
youcef ».*

*A toute la promo 2022, et à tous mes amis
de l sonalgaz sans exception.*

A tous ceux que je porte dans mon cœur.

Remerciements

Au premier lieu, nous tenons à remercier Dieu qui nous a donné le courage et la volonté pour terminer ce travail.

Un très grand merci à :

*Notre promoteur Mr . **BOUZID HANNACHI** pour nous avoir encadrés et orientés*

tout au long de cette recherche.

Nous remercions chaleureusement nos parents et nos familles.

Nous remercions aussi l'ensemble des enseignants du département

génie mécanique

Que tous ceux ou celles qui nous ont apportés leur soutien et qui nous ont aidé de loin ou de près pour l'achèvement de ce projet

trouvent ici l'expression

de notre vive et sincère reconnaissance, en particulier nos parents, nos familles et nos amis.



TABLE DE MATIERES

TABLE DES MATIERES

Chapitre I	Les matériaux	
I.1.Introduction		3
I.2.Grandes familles de matériaux		7
I.3.Métaux métalliques.....		7
I.3.1. Les matériaux ferreux.....		8
a. Acier		8
b. Les fontes		13
I.3.2. Métaux non ferreux		14
a. Aluminium.....		15
b. Le cuivre et ses alliages.....		16
I.4. Céramique et verre.....		17
I.4.1. Céramiques.....		17
I.4.2. Les verres		18
I.5. Matière polymères		19
I.6. Matériaux composites.....		21
I.7. Nanomatériaux.....		22
I.8. Conclusion		24
Chapitre II	Les biomatériaux	
II.1. Introduction		25
II.2. Définition des biomatériaux		26
II.3. Les différents types de biomatériaux		26
II.3.1. Les céramiques (Biocéramiques).....		28
a) Les avantages des céramiques.....		29
b) Les inconvénients des céramiques		29
c) Propriétés et applications des céramiques.....		30

II. 3.2. Les métaux (Biométaux).....	32
a) Avantages et inconvénients des biométaux.....	32
b) Propriétés et applications des biométaux.....	33
II.3.3. Polymères (Biopolymères).....	34
a) Avantages et inconvénients des biopolymères.....	36
b) Leurs inconvénients par rapport aux biocéramiques et biométaux.....	36
c) Propriétés et applications des biopolymères.....	36
II.3.4. Les Matériaux Composites (Biocomposites).....	37
II.3.5. Les matériaux naturels.....	39
A. Définition des matériaux Natural.....	40
B. Les Avantages et inconvénients des matériaux naturels.....	40
C. Propriétés et applications des matériaux naturels.....	40
II.4. Conclusion.....	41

Chapitre III

Les biocéramiques

III.1. Introduction.....	43
III.2. Classe des biocéramiques.....	43
III.2.1. Élaboration et mise en œuvre des biocéramiques.....	44
a) préparation par voie solide.....	44
b) La préparation par voie chimique sous pression atmosphérique normale.....	45
III.2.2. La structure cristalline.....	45
III.3. La porosité.....	46
III.4. La forme physique.....	46
III.5. Propriétés biologiques fondamentales.....	47
a) la biocompatibilité.....	47
b) La bioactivité.....	47
c) L'ostéoconduction.....	48
d) la biofonctionnalité.....	49
III.6. Principales applications biomédicale des biocéramiques.....	49
III.7. Application clinique : dans un système de prothèse totale de hanche.....	50
III.8. Les matériaux actuellement implantés.....	51

III.9. Conclusion	53
Chapitre IV	Techniques expérimental et discussions
IV.1. Introduction.....	55
IV.2. Définition de la gibbsite.....	55
IV.3. Modes d'élaboration	56
IV.3.1. Calcination.....	57
IV.3.2. Broyage.....	57
IV.3.3. Compactage	59
IV.4. Microscopie électronique à balayage (MEB)	61
IV.4.1. Analyse par diffraction des rayons X.....	62
IV.4.2. Spectroscopie IR.....	65
IV.5. Définition tribologique	67
IV.5.1. Système tribologique	67
IV.6. Les frottements	67
a. Définition	68
b. Types de frottement	68
IV.7. Le phénomène d'usure.....	69
a. Définition de l'usure	69
b. Les Causes de l'usure	69
c. Effets de l'usure	70
IV.7.1. Les mécanismes d'usure.....	70
a. L'usure par abrasion	70
b. L'usure par adhésion ou grippage	71
c. L'usure par fatigue.....	71
d. L'usure par réactions tribo chimiques	72
e. L'usure par corrosion	72
IV.8. Techniques expérimentales d'élaboration	72

IV.8.1. Types de matériaux nano structurés	72
IV.8.2 Propriétés des nanomatériaux.....	73
IV.9. Alumine- α	73
IV.9.1. Structure cristallographique	74
IV.9.2. Calcination des aluminés hydratés	75
IV.9.3. Broyage des poudres	76
IV.9.4. Les différents types des broyeurs.....	79
a) Attriteur :.....	79
b) Broyeur horizontal :	79
c) Broyeur vibratoire 1D :	79
d) Broyeur planétaire :.....	80
e) Broyeur vibratoire 3D :	81
IV.9.5. Conditions expérimentales du broyage	81
a) Mécanisme de broyage d'alliages et de composés	81
b) Composés intermétalliques désordonnés	82
c) Mécanisme d'amorphisation :	83
IV.9.6. Mise en forme.....	83
a) La compression en matrice fermée.....	83
b) La compression isostatique	83
IV.10. Frittage.....	84
a) Frittage en phase solide :.....	84
b) Frittage avec phase liquide.....	85
IV.11. Techniques de caractérisation.....	87
IV.11.1 Analyse spectrométrie (Infrarouge).....	87
IV.12. Caractérisations tribologiques	88
IV.12.1. Le coefficient de frottement	88
IV.12.2. Contact tribologique ponctuel	88

IV.12.3. Tests tribologiques	89
IV.13. Conclusion	90
conclusion generale	91
Références Bibliographiques.....	92

LISTE DES FIGURES

CHAPITRE I

Fig. (I.1) : Appareil de mesure de la conductivité et de la diffusivité thermique type Hotdisk.....5

Fig. (I.2) : Schéma de processus de fabrication d’acier..... 9

Fig. (I.3) : Désignation normalisée des aciers non alliés..... 12

Fig. (I.4) :Désignation normalisée des aciers spéciaux, non alliés..... 12

Fig. (I.5) : Désignation normalisée des aciers faiblement alliés..... 13

Fig. (I.6) : Désignation normalisée des produits laminés 15

Fig. (I.7) : Désignation normalisée des produits de fonderie16

Fig. (I.8) : Désignation normalisée des alliages de cuivre..... 17

Fig. (I.9) : Céramique technique..... 17

Fig. (I.10) : Céramique traditionnel..... 18

Fig. (I.11) : Les verres 19

Fig. (I.12) : Matière polymères..... 19

Fig. (I.13) : Plastiques..... 20

Fig. (I.14) : Les thermoplastiques..... 20

Fig. (I.15) : Thermodurcissant..... 21

Fig. (I.16) : Matériaux composite..... 22

Fig. (I.17) : Nanomatériaux 22

CHAPITRE II

Fig (II.1) : schéma de Classifications des biomatériaux.....25

Fig (II.2) : Biomatériaux répertoriés en fonction de leur bioactivité.....26

Fig (II.3) : Couple céramique / Polyéthylène.....27

Fig (II.4) : Biomatériaux en céramique (articulation artificielle de la hanche).....29

Fig (II.5) : Biomatériaux en céramique (sulfate de calcium).....29

Fig (II.6) : Les métaux (Bio métaux).....30

Fig (II.7) : Biomatériaux en Métaux (Prothèses de genou et de hanche).....31

Fig (II.8) : Plaques et vis de métal (images RX ;fractures en orthopédie).....32

Fig (II.9) : Soudure de vertèbres et racines dentaires.....32

Fig (II.10) : schéma représente la Structure du PMMA.....33

Fig (II.11) : Les Polymères.....34

Fig (II.12) : Les Matériaux Composites.....36

Fig (II.13) : Les Matériaux Naturels.....	37
Fig (II.14) : Les Matériaux Naturels.....	38

CHAPITRE III

Fig (III.1) : Élaboration et mise en œuvre des biocéramique.....	41
Fig (III.2) : Structure cristalline.....	42
Fig (III.3) : système de mesure de la porosité.....	43
Fig (III.4) : exemple de La forme physique d'un biocéramique.....	44
Fig (III.5) : la biocompatibilité d'un biocéramique.....	44
Fig (III.6) : La bio activité.....	45
Fig (III.7) : L'ostéoconduction.....	45
Fig (III.8) : la bio fonctionnalité.....	46
Fig (III.9) : applications biomédicale des biocéramiques.....	47
Fig (III.10) : Biocéramiques dans un système de prothèse totale de hanche.....	48
Fig (III.11) :Les matériaux actuellement implantés.....	49
Fig (III.12) : Les matériaux actuellement implantés.....	50

CHAPITRE IV

Fig (IV.1) : Schéma de principe du broyage à haute énergie.....	53
Fig (IV.2) : Broyeur planétaire.....	53
Fig (IV.3) : Etapes d'obtention des pastille.....	54
Fig (IV.5) : Cycle de frittage naturel de l'alumine.....	54
Fig (IV.6) : Schéma de l'essai de compression utilisé.....	54
Fig (IV.7) : Pastille d'alumine frittée.....	55
Fig (IV.8) : Principe d'un Microscope Electronique à Balayage(MEB).....	55
Fig (IV.9) : Micro graphies MEB de l'alumine-α.....	56
Fig (IV.10) : Spectre DRX de la gibbsite brute.....	57
Fig (IV.11) : Spectres de diffraction des rayons X de la gibbsite brute traitée à différentes températures.....	57
Fig (IV.12) : Spectre DRX de la gibbsite brute traitée à 1400°C pendant 6 heures (Alumineα).....	58
Fig (IV.13) : Spectres FTIR de référence de l'alumine alpha.....	58
Fig (IV.14) : Spectres FTIR de l'alumine alpha fritté à 1000°C.....	59
Fig (IV.15) : Schéma des quatre modes d'usure abrasive.....	59
Fig (IV.16) : Cisaillement des jonctions à l'interface et caractéristique de l'usure adhésive.....	60

Fig (IV.17) : traction de l'usure par fatigue.....	60
Fig (IV.18) : Image optique d'un tribo film de ZDDP.....	61
Fig (IV.19) : Représentation des quatre types de matériaux à nano structure.....	62
Fig (IV.20) : La Gibbsite.....	63
Fig (IV.21) : Micrographies MEB de la Gibbsite.....	67
Fig (IV.22) : Quelques photos de l'alumine alpha.....	68
Fig (IV.23) : Représentation de la maille primitive rhomboédrique de l'alumine- α	68
Fig (IV.24) : Calcination des alumines hydratées.....	69
Fig (IV.25) : Broyage des poudres.....	70
Fig (IV.26) : Schéma de principe du broyage à haute énergie.....	71
Fig (IV.27) : Le broyeur type Attriteur.....	72
Fig (IV.28) : Broyeur type horizontal.....	73
Fig (IV.29) : Broyeur type vibratoire 1D.....	74
Fig (IV.30) : Broyeur type planétaire	75
Fig (IV.31) : Broyeur vibratoire 3D.....	76
Fig (IV.32) : Broyage d'alliages et de composés.....	76
Fig (IV.33) : Représentation à 2D d'un défaut triple désordonné	77
Fig (IV.34) : Opération de frittage	77
Fig (IV.35) : Frittage avec phase liquide	78
Fig (IV.36) : Le four utilisé dans le frittage.....	79
Fig (IV.37) : Photo d'une microscopie infra rouge. [Laboratoire de la chimie université Abbess Laghrour de Khenchela.....	81
Fig (IV.38) : Principe de fonctionnement d'équipement FTIR.....	83
Fig (IV.39) : Diffractomètre Panalytical. [Laboratoire des sciences, Chaabt Ersass, université Frère Mentouri, Constantine.....	83
Fig (IV.40) : La Microscopie Electronique à Balayage(MEB).....	84
Fig (IV.41) : Un tribomètre.....	86

LISTE DES TABLEAUX

CHAPITRE I

Tableau (I.1) : suivant présente les principales propriétés mécaniques..... 4
Tableau (I.2) : Grandes familles de matériaux7
Tableau (I.3) : Influence des éléments d'addition 10
Tableau (I.4) : Matériaux couramment utilisés..... 11
Tableau (I.5) : Synthèse des caractéristiques des matériaux23

CHAPITRE II

Tableau (II.1) : des exemples sur biomatériaux céramiques et leur usage 28
Tableau (II.2) : des exemples sur les biomatériaux métalliques et leur usage31
Tableau (II.3) : exemples sur les biomatériaux polymères et leur usage.....35
Tableau (II.4) : exemples sur les biomatériaux naturels et leur usage39

CHAPITRE IV

Tableau (IV.1) : Position atomique de l'amine- α 61
Tableau (IV.2) : Les valeurs d'affectations de spectroscopie IR..... 63
Tableau (IV.3) : Techniques de broyage couramment employées 75
Tableau (IV.4) : Les conditions des essais tribologiques 86

INTRODUCTION GENERALE

INTRODUCTION GENERALE

Les prothèses sont des rotules mécaniques qui reprennent la fonction articulaire naturelle d'une hanche défaillante (arthrose, rupture du col du fémur...) et qui permettent au patient de reprendre une "vie normale". Dans les années 1970, l'utilisation de matériaux céramiques pour réduire l'usure des composants frottantes de la prothèse a fait surgir de nouvelles problématiques mécaniques comme celle du *squeaking*. Le *squeaking* est un bruit aigu, souvent associé à celui d'un grincement de porte, provoqué par la prothèse lors de mouvements des membres inférieurs [1].

Les nanotechnologies se sont récemment imposées comme un thème majeur de la recherche tant pour les sciences fondamentales que pour les applications. La recherche dans ce domaine est pluridisciplinaire et s'appuie pour une grande part sur le développement de nanomatériaux. Ceux-ci constituent, en effet, les matières premières des nanotechnologies et ouvrent à l'industrie des perspectives extrêmement larges. Toutes les grandes familles de matériaux sont concernées : métaux, céramiques, polymères.

Le développement des céramiques nécessite une grande maîtrise des procédés d'élaboration (élaboration des nano-poudres, mise en forme, frittage, usinage, études de propriétés finales, etc...), qui permettent d'obtenir les microstructures appropriées et qui doivent conduire à la réalisation de pièces à faible coût mais avec une grande fiabilité dans des différents applications biomédicales [2].

De nombreuses études se sont intéressées à la fabrication de matériaux métalliques massifs nanostructurés. Deux approches existent pour leur élaboration, l'approche dite «Bottom-Up», qui consiste à synthétiser des poudres nanométriques qui sont ensuite consolidées et densifiées pour obtenir un matériau massif, la principale difficulté réside dans l'obtention d'échantillons totalement denses, l'approche dite « top-down », qui consiste à affiner la taille de grains d'un matériau massif microcristallin par déformation sévère. La taille de grains minimale accessible par ce mode de fabrication reste cependant limitée à quelques centaines de nanomètres. Ces différentes voies de synthèse offrent un large panel de microstructures, ce qui s'avère intéressant pour l'étude des propriétés [3].

Ce travail avait comme objectif l'étude de la l'évolution microstructurale et tribologique de nanocéramiques de type oxydes. Nous sommes intéressés au cas de l'alumine- α . Cependant, une poudre de la gibbsite est une poudre de départ présentant des phases initiales métastables. Cette gibbsite subira donc des transformations de phases lors de la montée en température qui pourront interférer lors de la calcination, broyage et frittage.

Ce travail, organisé en plusieurs chapitres, avait donc pour objectif de suivre les transformations de phase et leurs effets sur la microstructure d'une alumine- α et son comportement tribologique pour une interaction tolérable ou une biocompatibilité totale avec le corps vivant.

- Le premier chapitre expose généralités sur les matériaux.
- Dans ce but, le deuxième et troisième chapitre consiste en une synthèse bibliographique, dans laquelle sont d'abord rappelées les classes des biomatériaux et biocéramiques, puis ensuite, les propriétés et les applications des biomatériaux et biocéramiques.
- Le dernier chapitre a été consacré à une élaboration de l'alumine- α dans une première partie, la deuxième partie consiste à une étude de leurs structures par les techniques de caractérisations usuelles (MEB, DRX, FTIR...) qui permettra de collecter des informations peut être nécessaires à la compréhension de leurs propriétés. Dans un but ultime, nous souhaiterons explorer les possibilités d'application de ces matériaux qui présentent à la fois des caractéristiques biocompatibles.

Nous allons présenter les méthodes expérimentales utilisées pour l'élaboration des alumines et de la caractérisation structurale et tribologique telles que : Microscope électronique à balayage, Diffraction des rayons X, spectromètre IR (FTIR)

Nous terminons notre travail par une conclusion générale et les perspectives à donner pour ce travail.

Enfin, **la question** qu'on doit poser pour illustrer notre travail est : comment fait l'élaboration de ce matériau ? et est-ce qu'il contient les conditions de biocompatibilité ?

CHAPITRE I

LES MATERIEAUX

I.1.Introduction

Le développement de la science des matériaux, des techniques liées à la formation des produits, l'émergence des nanotechnologies ou encore l'urgence de penser le design environnemental rendent cette étude complexe. C'est pourquoi ce cours ne prétend pas aborder le sujet de manière exhaustive ; Il vise à créer une base solide sur laquelle se construit une forte culture technologique. [1]

➤ Propriétés physiques des matériaux

Les métaux sont caractérisés par de bonnes propriétés physiques (conductibilité thermique et électrique, etc.) et par des qualités mécaniques (élasticité, ductilité, ténacité) [3].

➤ Propriétés mécaniques

La connaissance des propriétés mécaniques des matériaux est essentielle à la conception et à la fabrication d'objets techniques. Afin que l'objet technique remplisse sa fonction globale et résiste aux différentes contraintes qu'il subit, il est important de sélectionner les matériaux adéquats[6].

Tableau (I.1) : suivant présente les principales propriétés mécaniques [5].

<i>Propriété mécanique</i>	Description	Exemples de matériaux
<i>Ductilité</i>	Capacité de s'étirer sans se rompre et de conserver sa nouvelle forme	Le cuivre L'or
<i>Dureté</i>	Capacité de résister à la pénétration et aux rayures	L'acier La porcelaine
<i>Élasticité</i>	Capacité de se déformer, puis de reprendre sa forme initiale	Le caoutchouc Le polychloroprène
<i>Fragilité</i>	Capacité de se casser facilement	Le verre La porcelaine
<i>Malléabilité</i>	Capacité de s'aplatir ou de se courber sans se rompre et de conserver sa nouvelle forme	L'aluminium Le cuivre
<i>Résilience</i>	Capacité de résister aux chocs	La fonte La mélamine
<i>Rigidité</i>	Capacité de résister à la déformation	Le béton armé Le contreplaqué

➤ Propriétés électriques

La propriété de conduction de l'électricité, ou son contraire, est essentielle pour de très nombreuses réalisations industrielles. Les applications sont bien connues : transport de l'énergie électrique, chauffage, mais aussi phénomènes variés dans les circuits «électroniques».

Nous allons passer en revue les grandeurs physiques qui décrivent ces comportements [4].

✓ Résistance électrique

Le matériau est capable de conduire un courant électrique sous une forme ou une autre. Cela est dû à la possibilité de faire circuler librement des électrons dans le matériau. Elle varie avec la température[3]. On calculera la résistance d'un conducteur de longueur L et de section S avec : $R=\rho(L/S)$.

• Grandeurs caractéristiques : résistivité électrique en $\Omega \cdot m$. Si $\rho < 10^{-6} \Omega \cdot m$, le matériau est dit conducteur. Il est dit isolant si $\rho > 10^{10} \Omega \cdot m$. Les semi-conducteurs ont une résistivité intermédiaire (et sont isolants au zéro absolu).[3]

• Ordres de grandeur (à une température de 25 °C) :

Cuivre : $\rho = 17 \cdot 10^{-9} \Omega \cdot m$.

Carbone : $\rho = 40 \cdot 10^{-6} \Omega \cdot m$.

Fer : $\rho = 100 \cdot 10^{-9} \Omega \cdot m$.

Verre : $\rho > 10^{12} \Omega \cdot m$.

✓ Conductivité électrique

La conductivité électrique, notée σ , est la grandeur inverse de la résistivité :

$\sigma = 1/\rho$ avec σ en $S \cdot m^{-1}$ (siemens par mètre)[6].

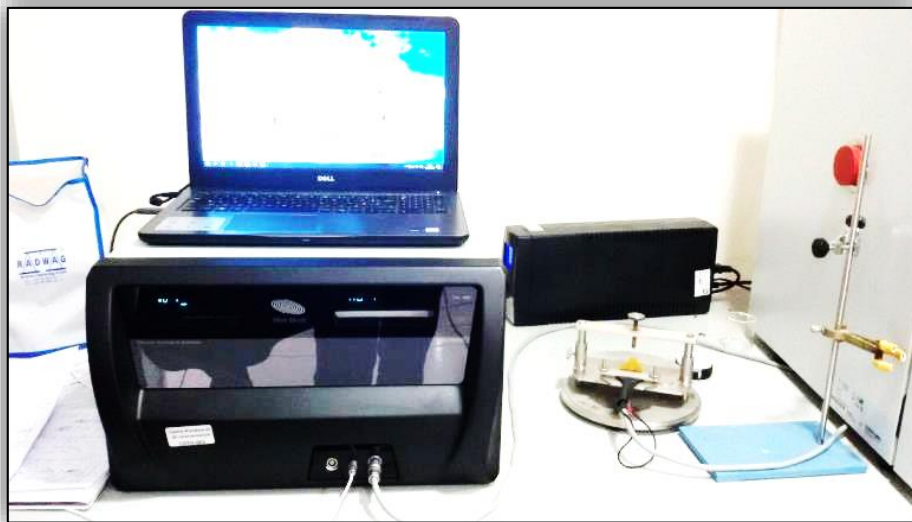


Fig.(I.1) : Appareil de mesure de la conductivité et de la diffusivité thermique type Hotdisk[4]

➤ Propriétés thermiques

Les propriétés thermiques du matériau interviennent à deux niveaux. D'une part, sur le comportement du biomatériau en bouche, même si les variations de température buccales semblent relativement limitées, et d'autre part, lors de l'élaboration d'une prothèse où les conditions thermiques seront plus élevées [1].

✓ Conductivité thermique

C'est la quantité de chaleur transférée en une unité de temps à travers une substance d'une unité de surface et d'une unité d'épaisseur, lorsque les côtés opposés diffèrent d'une unité de température. La conductivité thermique est le mode de transfert de chaleur correspondant. Plus la valeur de conductivité thermique est faible et plus le matériau isolant est élevé, plus la conductivité thermique est élevée, plus le matériau conducteur est élevé[4].

- Grandeur caractéristique : conductivité thermique λ en $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ (watts par mètre-elvin).
- Ordres de grandeur (à une température de 20 °C)[6]

Polystyrène exp . : $\lambda = 0,036 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$,

- Acier doux : $\lambda = 46 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$,
- Chêne : $\lambda = 0,16 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$,
- Aluminium: $\lambda = 237 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$

✓ Dilatation thermique

Lorsqu'un matériau isotrope subit une variation de température ses dimensions varient proportionnellement à la variation de température ΔT [3]: $\Delta L/L = \alpha \Delta T$. Ce coefficient α prend une valeur positive, elle-même dépendante de la température. Donc la loi d'allongement ci-dessus n'est qu'une approximation et la linéarité n'est plus valide lorsque l'on considère des grandes différences de températures [2].

- Grandeur caractéristique : coefficient de dilatation thermique linéaire α en K^{-1}
- Ordres de grandeur[3]:
Verre : $\alpha = 4,10 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$, Acier : $\alpha = 12 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$,
Titane : $\alpha = 8,6 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$, Polypropylène : $\alpha = 150 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$.

✓ Température de fusion

Le point de fusion du corps est la température à une certaine pression, à laquelle fond un élément pur ou un composé chimique, c'est-à-dire qu'il passe d'un état solide à un état liquide [3].

- Grandeur caractéristique : température de fusion T_f en °C
- Ordres de grandeur[4] :

- Polypropylène : $T_f = 163 \text{ }^\circ\text{C}$,
- Fer : $T_f = 1538 \text{ }^\circ\text{C}$,
- Cuivre : $T_f = 1085 \text{ }^\circ\text{C}$,
- Tungstène : $T_f = 3422 \text{ }^\circ\text{C}$.

I.2. Grandes familles de matériaux

Les différents matériaux existants peuvent être classés selon leur origine ; naturel ou synthétique, ou bien selon les propriétés physiques et chimiques qu'ils possèdent. La plupart de ces propriétés dépendent fortement du type d'interaction entre atomes ou molécules qui assurent leur cohésion [6].

Ces liaisons interatomiques conditionnent en effet, dans une large mesure, la structure de la matière à l'échelle atomique ou moléculaire, structure dont la cristallographie et les défauts ont des conséquences capitales sur les caractéristiques physico-chimiques et mécaniques du matériau. Il est donc raisonnable de les classer en fonction des différents types de liaisons chimiques [5].

Tableau (I.2) : Grandes familles de matériaux [5]

Familles de matériaux	Les métaux	Les matières plastiques	Les organiques	Les minéraux	Les composites
Origines des matériaux	Origine naturelle, on les trouve dans le sol sous forme de minerais.	Origine synthétique, le plastique est créé avec du pétrole	Origine naturelle, ils viennent des végétaux ou des animaux.	Origine naturelle, on les fabrique grâce à la fusion du quartz prélevé dans le sable ou l'argile.	Un matériau composite est un matériau qui est constitué d'au moins deux matériaux de nature différente.

I.3. Métaux métalliques

Ce sont en quelque sorte les "ancêtres" des biomatériaux puisque ce sont les premiers à avoir été utilisés pour faire des implants. Le plus important par les volumes est sans doute l'acier inoxydable, encore largement utilisé en chirurgie orthopédique. L'intérêt de l'acier inoxydable dans ce domaine réside dans ses propriétés mécaniques [4]. Il faut également mentionner particulièrement le titane, qui est utilisé principalement en chirurgie orthopédique

et pour réaliser des implants dentaires. On le trouve également dans les stimulateurs cardiaques et les pompes implantables. L'un des avantages principaux du titane est sa bonne biocompatibilité : l'os adhère spontanément au titane. Les alliages à mémoire de forme sont une variante intéressante de cette catégorie. On utilise également des alliages cobalt, chrome, molybdène, du tantale, etc[6].

Les principaux problèmes mal résolus avec les métaux et alliages métalliques sont les suivants : corrosion électrochimique et durabilité, mécanismes de dégradation non électrochimiques incluant les interactions protéine/métal, · réactions immunitaires et d'hypersensibilité, adaptation des propriétés mécaniques, · propriétés de frottements et problèmes de débris [3]. Il existe deux types des aciers ferreux et non ferreux.

I.3.1. Les matériaux ferreux

La ferronnerie est l'art de fabriquer des objets ou des ornements architecturaux en fer, comme les garde corps pansu. Elle englobe toutes les techniques pour travailler le fer ou d'autres métaux ferreux, à la forge, au marteau ou à l'étau. Le terme ferronnerie désigne aussi tous les articles en fer forgé. La technique consiste à chauffer le fer entre 800 et 1450°C, ce qui le rend mou et malléable. Il est ensuite travaillé, étiré et enroulé au marteau et à l'enclume pour prendre la forme souhaitée. C'est le façonnage, qui peut être suivi d'un travail du métal à froid. Cela permet la personnalisation des pièces de fer forgé, qui une fois nettoyées par sablage, seront ensuite assemblées et soudées, puis peintes. La plupart des métaux peuvent être forgés. Mais les plus utilisés sont le fer pur, l'acier, le bronze, ou le laiton.

a. Acier

L'acier est un alliage entre le fer et le carbone dont la teneur, variable, a une masse inférieure à 1,7% ($\approx 2\%$). Après cela, on peut ajouter différents éléments d'addition (chrome, nickel, ...). Pour améliorer certaines propriétés (dureté, résistance à l'usure...) et constituer des familles d'aciers alliés (inoxydables...)[4]. On peut considérer 4 familles principales d'aciers :

Aciers au carbone d'usage général : faible teneur en carbone ($< 0,2\%$)

- Utilisation : constructions mécaniques, emboutissage, constructions soudées et chaudronnerie, aciers à béton
- Désignation : lettre S (aciers de construction) ou E (aciers de construction mécanique) suivie

de la limite élastique R_e en MPa. On peut faire précéder ce nom de la lettre G s'il s'agit d'un acier moulé[3].

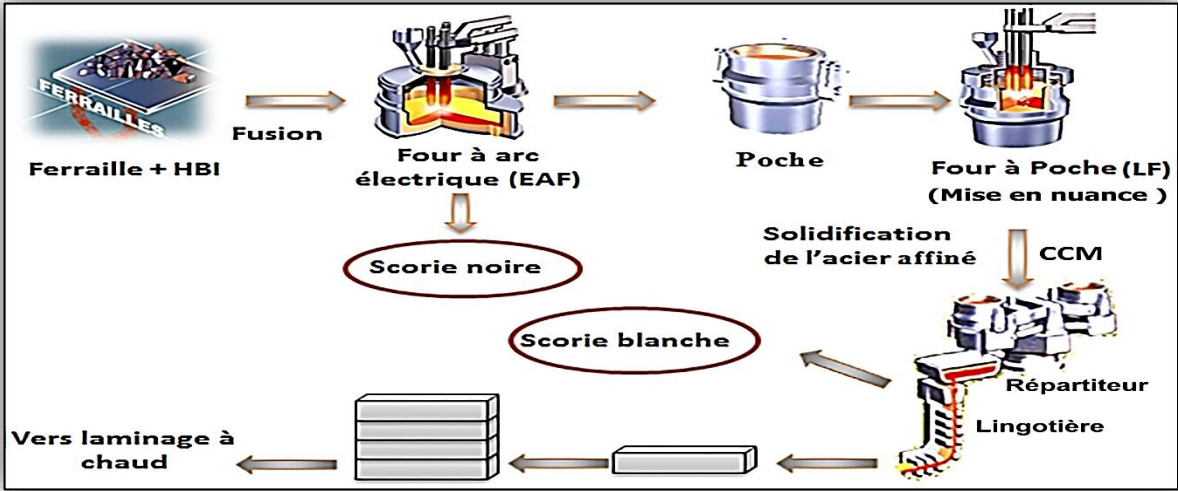


Fig.(I.2) :Schéma de processus de fabrication d'acier[5]

➤ **Influence des éléments d'addition**

Tableau (I.3) : Influence des éléments d'addition [5]

Elément	Symbole chimique	Rrdureté	Ductilité	KRrésilience	Trempeabilité	soudabilité	Friabilité	Usinabilité	Magnétisme
Chrome	Cr	++	-	+	++	-		-	++
Cobalt	Co	+		+	-			+	
Manga	Mn	++	+	+	+++	+	+		
Molybdène	Mo	++	+	+	+++	+	+		+
Nickel	Ni	+	+	+	++		+	-	+
Phosphor	P	+	-		+				
Selenium	Si	+	-		++	-		-	-
titan	T	+	+	+	++		+	+	+
tungstène	W	+	+	+	+++			+	+
vanadium	V	+	+	+	+++	+	+		

➤ **Traitements thermiques des métaux**

Les traitements thermiques ont pour objectif d'améliorer uniformément ou localement certaines propriétés mécaniques des métaux[4].

- Trempe : refroidissement rapide d'un acier préalablement chauffé ($\approx 900\text{ }^{\circ}\text{C}$) pour augmenter sa résistance et sa dureté (H). Peut-être superficielle si on souhaite uniquement augmenter la dureté en surface[2].
- Revenu : pratiqué après la trempe, il permet d'en corriger les aspects négatifs. On chauffe l'acier ($\approx 500\text{ }^{\circ}\text{C}$) puis on le refroidit lentement. Augmente la résilience et la malléabilité.

- Recuit : effet inverse à celui de la trempe. On chauffe l'acier (≈ 900 °C) puis on le maintient à température avant un refroidissement lent [3]
- Cémentation : traitement thermochimique destiné à augmenter la dureté, par apport de carbone localisé sur la surface à traiter. On peut aussi modifier certaines propriétés mécaniques des métaux par corroyage (déformation plastique à chaud ou à froid) : forgeage, laminage, filage (phénomène d'écroutissage) [3].

Tableau (I.4) : Matériaux couramment utilisés [3]

Désignation	Ancienne norme	Re mini (MPa)	Rm mini (MPa)	Remarques
EN-GJL200	Ft20ouFGL200	130	200	Aptitudes au moulage. Usinage et frottement
EN-GJS500-7	FGS500-7	320	470	Aptitudes à l'usinage. Aux chocs
E295	A50	295	410	Pour construction mécanique
S235	E24	235	340	Pour construction
S355	E36	355	500	Pour construction
C40	XC42TS	520	670	TE 830 Revenu 500
C70	XC70	550	800	Ressorts-TH850rVenu550
34CrMo 4	35CD4	850	1080	TH850Revenu550
NiCrMo16	35NCD16	900	1450	TH850Revenu550ouTrempe à l'air875
56Si7	55S8	750	1000	Ressorts-TH850Revenu550
25CrMo4	25CD4	700	930	TH850Revenu550
16NiCr6	16NC6	830	1080	Cémentation+TH850Revenu200
40CrALMo6-1	40CAD6-12	600	930	Nitruration
CuSn12Pb	UE12P	150	270	Bronze
ENAC-ALSi5C	ALSi5Cu3	90	140	Moulage et usinage
ENAW-2017	ALCu4Mg	240	380	Duralumin-Ne pas utiliser en moulage

- Exemples : S235, E360, GS355

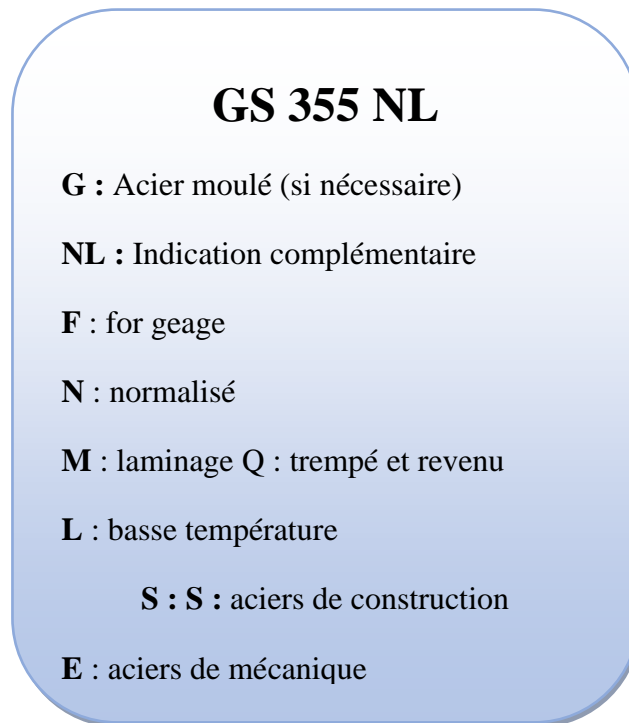


Fig.(I.3) : Désignation normalisée des aciers non alliés [3]

➤ Aciers non alliés

Plus grande teneur en carbone, composition chimique plus fine, très faible quantité d'éléments d'addition ($Mn < 1\%$, $Cr+Mo+Ni < 0,63\%$)[2].

- Utilisation : aciers pour traitements thermiques, pièces petites ou moyennes.
- Désignation : lettre C suivie de la teneur en carbone en pourcentage multipliée par 100 (et précédé de G si moulé)[4].
- Exemple : C40 (contient 0,4% de carbone), GC70

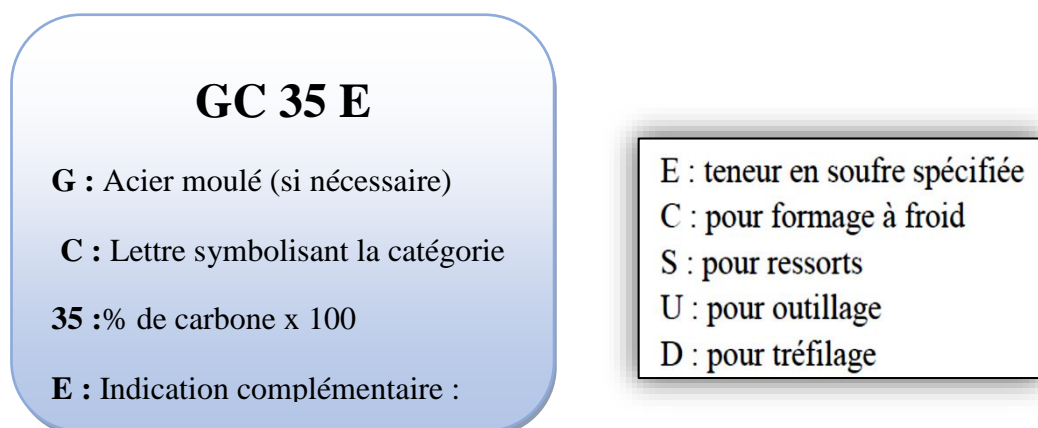


Fig.(I.4) : Désignation normalisée des aciers spéciaux, non alliés [3]

➤ **Aciers faiblement alliés**

Aucun élément d'addition ne dépasse 5%

- Utilisation : aciers pour traitements thermiques et hautes résistances...
- Désignation : pourcentage de carbone $\times 100$, symbole chimiques des principaux éléments d'addition classés par ordre décroissant et dans le même ordre, pourcentage de ces mêmes éléments (avec multiplicateur selon l'élément)[3].
- Exemple : 30 Cr NiMo 8 (acier ayant 0,30% de carbone, 2% de chrome, et moins de 1% de nickel et de molybdène)[4].

G35 NiCrMo 16

G : Acier moulé (si nécessaire)

NiCrMo : Principaux éléments d'addition (dans l'ordre)

16 : Teneur en % des éléments d'addition (même ordre)

35 : % de Carbone $\times 100$

Fig. (I.5) : Désignation normalisée des aciers faiblement alliés [3]

➤ **Aciers fortement alliés**

au moins un élément d'addition dépasse 5% en masse.

- Utilisation : usages particuliers comme les aciers inoxydables, aciers réfractaires, aciers à outils...
- Désignation : lettre X suivie du pourcentage en carbone, symbole chimiques des principaux éléments d'addition classés par ordre décroissant et dans le même ordre, pourcentage de ces mêmes éléments[1].

b. Les fontes

➤ **Définition d'une fonte**

Par définition on parlera de fonte dans le cas d'un alliage Fe-C titrant plus de 2.03 % de carbone. C'est la teneur limite au-delà de laquelle la fin de la solidification se produit selon le mode eutectique, avec du carbone apparaissant soit sous forme de graphite (fonte grise), soit sous forme de carbure de fer (fonte blanche). La « couleur » grise ou blanche correspond à l'aspect de la surface de rupture, gris ou métallique, par exemple lors d'un essai de traction.

➤ L'élaboration de la fonte

L'élaboration de fontes à graphite sphéroïdal (dites fontes GS) demande une sélection stricte des matières premières à utiliser (afin de limiter la teneur en soufre) ainsi qu'un contrôle des compositions. En particulier une teneur en magnésium résiduel minimale sera nécessaire pour garantir le maintien de la forme sphéroïdale tout au long de la solidification.

Comme dans le cas de l'inoculation, le traitement au magnésium est sujet à un phénomène d'évanouissement : le magnésium est en effet à l'état de vapeur à la température de la fonte liquide et il va donc continuellement s'évaporer et progressivement disparaître –en même temps que son rôle sphéroïdisant- tant que la fonte sera liquide.

De plus, le magnésium est également susceptible de réagir avec l'oxygène atmosphérique, à la faveur des turbulences (transfert de métal, coulée en moule). Une diminution de la teneur en magnésium résiduel va se traduire par une baisse de la nodularité (la proportion de particules de forme sphérique ou approchée), avec une chute associée de la ductilité. Une nodularité minimale de 80% est souvent demandée, mais des valeurs plus élevées sont requises pour des applications spécifiques.

Par ailleurs, dans le cas des fontes à graphite lamellaire, un germe donnait lieu à la solidification d'une cellule eutectique et donc de plusieurs lamelles de graphite. Au contraire, dans le cas des fontes GS, un germe ne donnera naissance qu'à une seule particule de graphite. Dans le cas de ces fontes, l'inoculation devient donc une opération essentielle pour obtenir les propriétés désirées (en particulier la ductilité) et non plus seulement, empêcher l'apparition de carbures de fer.

Une inoculation insuffisante se traduira par une densité de particules plus faible et donc, le volume de graphite précipité restant approximativement constant, une taille moyenne de particules plus importante. La nodularité va également diminuer en même temps que la densité de sphéroïdes.

I.3.2. Métaux non ferreux

Ces métaux ont souvent une température de fusion basse (facilite le moulage), une grande malléabilité (favorise la déformation à froid) et une bonne usinabilité.

- Avantages par rapport aux aciers : résistance à la corrosion, facilité de fabrication, conductivité électrique, conductivité thermique, légèreté, couleur...
- Inconvénients : résistance mécanique plus faible, soudabilité inférieure

• Principales familles : aluminium, cuivre, magnésium, zinc, titane...On peut aborder rapidement quelques-unes de ces différentes familles : [5]

a. Aluminium

Aluminium désigne un métal blanc gris, très léger, ductile et malléable, et qui s'altère peu à l'air. L'aluminium est utilisé dans la fabrication d'articles de ménage et, à cause de sa légèreté, pur ou en alliage, dans l'automobile et l'aéronautique, dans l'industrie électrique.

➤ Aluminium et alliages corroyés :

ce sont les métaux les plus utilisés après les aciers (alliages légers).[4]

- Utilisation : produits à base de profilés, tôles, plaques, etc.
- Désignation : préfixe EN AW suivi d'un nombre à 4 chiffres pour identifier l'alliage. Au besoin, on rajoute entre crochets le symbole chimique de l'alliage.
- Exemple : EN AW-2017 [AlCu4MgSi] (alliage avec 4% de cuivre, 0,5% de magnésium et 0,5% de silicium)[4].

EN AW - 2017 [AlCu4MgSi]

EN AW : Préfixe

2 : Famille de l'alliage :

1 : aluminium pur ($\geq 99\%$)

2 : Al + Cu 3 : Al + Mn

4 : Al + Si 5 : Al + Mg

6 : Al + Mg + Si 7 : Al + Zn

8 : Al autres éléments

0 : - aluminium pur : indice de pureté (0 à 9)

Fig.(I.6) : Désignation normalisée des produits laminés[3]

➤ **Aluminium et alliages pour la fonderie**

faciles à mouler, en moule métallique ou moulage sable.

- Utilisation : pièces de fonderie en petite, moyenne et grande série.
- Désignation : préfixe EN AC suivi du symbole chimique de l'alliage.
- Exemple : EN AC Si12CuMgNi (alliage pour pièce moulée avec 12% de silicium, et moins de 1% de cuivre, de magnésium et de silicium.) [2].

EN AC - 45400 [AlSi5Cu3]

EN : Préfixe

[AlSi5Cu3] Symbole chimique

A : Aluminium

C :B : lingot C : pièce moulée M : alliage mère

45400: 21xxx: AlCu

41xxx AlSiMg Ti

Fig.(I.7) : Désignation normalisée des produits de fonderie[3]

b. Le cuivre et ses alliages

La famille de métaux la plus importante après l'aluminium. Les alliages de cuivre ne sont pas utilisés dans la fabrication de cadres ou de pièces de structure. Ils sont dans général Bel aspect décoratif [6].

- Certains alliages : cuivre : cuivre + zinc (cuivre + zinc), bronze : cuivre + étain (cuivre + étain), maillechort : cuivre + nickel + zinc (cuivre + nickel + zinc).
- Désignation : le préfixe Cu suivi des symboles chimiques des composants des principaux additifs avec leur pourcentage.
- Exemple : CuZn19Al6 (cuivre haute résistance) [4].

CuZn27Ni18

Cu : symbole chimique du métal de base

Zn Ni : principaux éléments d'addition dans l'ordre

27 18 : teneur en % des éléments d'addition (même ordre)

Fig. (I.8) : Désignation normalisée des alliages de cuivre [3]

I.4. Céramique et verre

La porcelaine est l'un des matériaux formés par l'homme pour la première fois : poterie, vases, amphores, etc. Ce sont des substances inorganiques et non métalliques. Il existe deux grandes familles [3]

I.4.1. Céramiques

On peut distinguer deux catégories de céramiques : [4]

➤ **Techniques** : Elles sont issues de la chimie de synthèse et leur composition est précisément définie. Il s'agit le plus souvent d'oxydes, de carbures ou de nitrures (Al_2O_3 , SiC...) [6].



Fig. (I.9) : Céramique technique [1]

- **Traditionnel** : Il est dérivé de minéraux communs et sa composition est variable. Le ciment et le béton sont apparentés à cette famille [5]



Fig. (I.10) : Céramique traditionnel [3]

I.4.2. Les verres

Ce sont des minéraux courants qui se distinguent par leur forte teneur en silice et leur structure vitreuse complètement amorphe. La céramique et le verre ont pour caractéristiques principales d'être cassants : le paramètre K_c caractérisant la capacité à résister à la propagation des fissures (dureté) revêt ici une importance particulière [6].

Ils résistent mal aux contraintes de traction. D'autre part, il résiste bien aux contraintes de compression, à l'usure et aux hautes températures (en particulier la céramique) ; Ce sont des matériaux réfractaires. Ces ont aussi de bons isolants électriques et thermiques [4].

des additifs (pigments, retardateurs de flamme) [2]. On peut considérer 3 familles de base de plastique [1]

Exemple. Les plastiques : naturels (caoutchouc) ou synthétiques, et peuvent être considérés comme une famille supplémentaire de polymères aux caractéristiques bien particulières. Spécialisez-vous avec une très grande flexibilité [5].

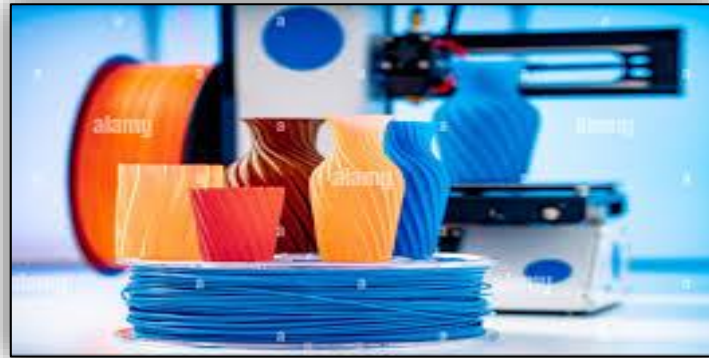


Fig. (I.13) : Plastiques [6]

➤ **Les thermoplastiques :** les plus nombreux (90% de la production) et les plus simples d'utilisation, ils se ramollissent et se déforment sous l'effet de la chaleur. Il peut, en théorie, être refondu et réutilisé plusieurs fois. Exemples : ABS, PMMA, PTFE, PP[1].



Fig. (I.14) : Les thermoplastiques

➤ **Thermodurcissant :** plus difficile à appliquer, il ne ramollit pas sous l'action de la chaleur mais durcit et durcit. Une fois créé, il ne peut plus être reconfiguré par chauffage. De nombreux adhésifs et revêtements appartiennent à cette famille. Exemples : EP (araldite), UP (polyester)[3].



Fig. (I.15) : Thermodurcissant

Dans divers secteurs de l'industrie, on peut aussi utiliser les matériaux naturels, qui, de part leurs propriétés spécifiques, conviennent à de nombreuses applications. On peut distinguer quelques grandes familles, de par leur origine [6] :

1. Origine végétale: bois (habitat, construction navale..), chanvre (isolation)
2. Origine animale: laine de mouton, soie,
3. Origine minérale : roches, graviers, argile

I.6. Matériaux composites

Une substance composite est la combinaison d'au moins deux substances non miscibles. Cette corrélation permet d'atteindre des performances mécaniques et/ou physico-chimiques auxquels les composants principaux ne peuvent pas accéder par eux-mêmes. [5]

La composition la plus courante est formée de renforts fibreux noyés dans une matrice :

- Le renfort (ou armature) joue le rôle du squelette, il apporte la résistance mécanique (dureté et résistance).
- La matrice agit comme un liant, solidifiant la forme finale de la pièce. Il assure également la transmission des efforts aux fibres. Ce transfert d'efforts entre les fibres et la matrice n'est efficace que si l'adhésion fibre/matrice (rôle de l'interface) est de bonne qualité. Selon la nature des composants, les matériaux composites peuvent être classés en plusieurs familles [4].
- La famille, de loin la plus représentative, comprend les matériaux composites constitués de fibres d'origine minérale ou organique (fibres de verre, de carbone ou d'aramide), associées à des matrices organiques [5].
- D'autres familles occupent des secteurs industriels très spécifiques (domaine, etc.), et sont utilisées dans des applications très spécifiques (résistance aux hautes températures, aux rayures très fortes, etc.). Dans ces familles, on peut citer les composés à fibres céramiques ou

métalliques associées à des matrices également céramiques ou métalliques, ou encore les composés carbone/carbone [6].

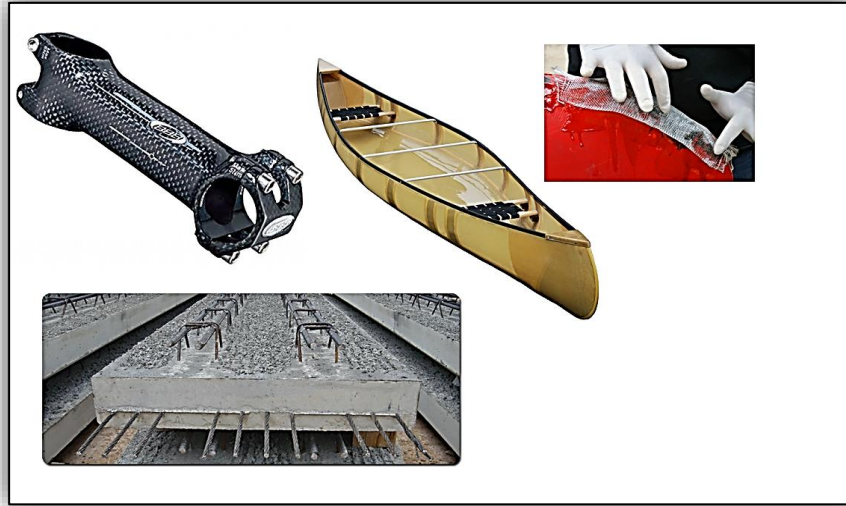


Fig. (I.16) : Matériaux composite [6]

I.7. Nanomatériaux

Un nanomatériau est une substance (sous forme de poudre, d'aérosol ou de semi-gaz, de suspension liquide ou de gel) qui présente des avantages spécifiques en raison de sa taille et de sa structure nanométrique [4]. Les nanomatériaux - au sens général du terme - sont généralement issus des nanotechnologies, par opposition aux nanoparticules qui peuvent être d'origine naturelle ou résulter de procédés tels que le soudage, le fumage, le polissage, etc.[5]. L'avantage de l'utilisation de ces matériaux, et le développement scientifique et technologique rapide dans ce domaine. Cependant, du fait de leur taille (entre 1 et 100 nm), la manipulation des nanomatériaux présente des risques sanitaires et industriels actuellement difficiles à évaluer [4]

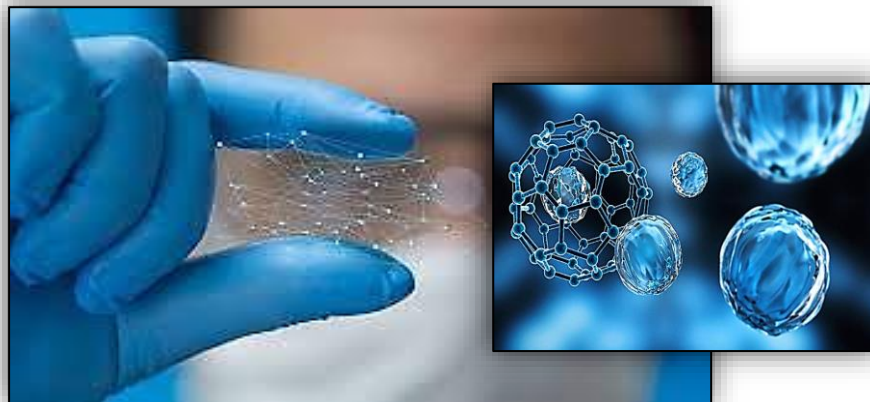


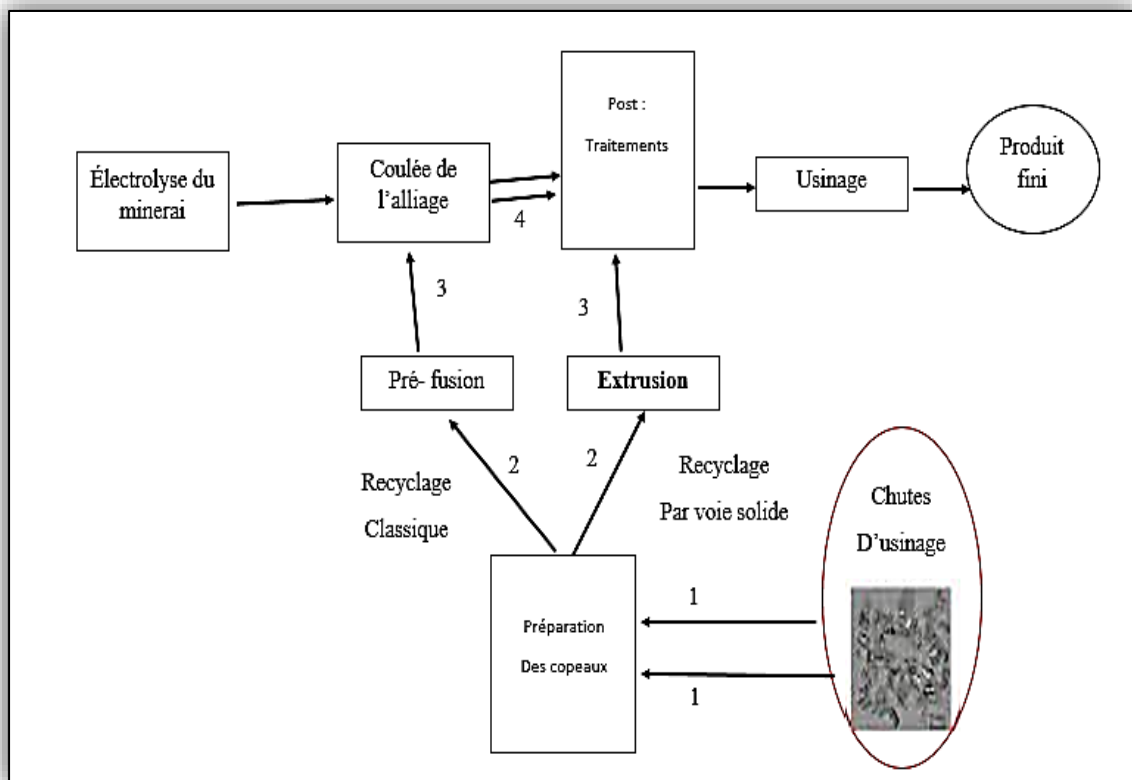
Fig. (I.17) : Nanomatériaux [6]

➤ Synthèse des caractéristiques des matériaux :

Tableau (I.5) : Synthèse des caractéristiques des matériaux [2]

Caractéristique	Métaux	Céramiques	Polymères	Composites
Densité	Moyenne/élevée	moyenne	Faible /trèsfaible	Moyenne/faible
prix	Faible/élevé	Élevé (techniques) Faible(gr de diffusion)	Faible /élevé	Élevé
Module élasticité	élevé	Trèsélevé	Moyenne/faible	Élevé
Résistance mécanique	élevé	Trèsélevé	Moyenne/faible	Élevé
Tolérance aux défauts et ou chocs	Trèstenace	Très fragile	Peu tenaces mais grande énergie absorbée	Trèstenace
Température d'utilisation	Moyenne/hautes	Hautes/trèshautes	Moyenne/faible	moyenne
Tenue aux agressions chimiques	Moyenne/mauvaise	Bonne /très bonne	Moyenne	moyenne
Conduction de la chaleur	Bonne/très bonne	Moyenne/faible	Faible /très faible	faible
Conduction de l'électricité	Bonne/très bonne	Faible /très faible		Moyenne
Facilité de mise en forme	facile	Difficile (technique) Facile(gr de diffusion)	Très facile	Difficile
Facilité d'assemblage	facile	moyenne	facile	

➤ **Processus de sélection des matériaux [4]**



I.8. Conclusion

Le choix d'un procédé de mise en forme est fonction du matériau retenu et des caractéristiques du produit. (Forme, dimensions, cadence, matériau, ...).

CHAPITRE II

LES BIOMATERIAUX

II.1. Introduction

Les Egyptiens essayaient déjà de remplacer tout ou partie d'organes défaillants par des substituts : fer, cuivre, plomb, bois, plâtre, amalgames,... Jusqu'au milieu du XXe siècle les biomatériaux étaient plutôt constitués d'or, d'argent et de cuivre. Ils servaient en chirurgie dentaire et orthopédique. Le développement des biomatériaux en médecine doit beaucoup à la recherche dans les industries chimiques, métallurgiques, nucléaires, aéronautiques qui ont été des viviers féconds et le sont toujours. Leurs connaissances ont été sources de progrès considérables pour la santé. Les progrès de la chirurgie reconstructive, orthopédique et vasculaires ont traduits par une demande de plus en plus pressante de matériaux pour implantation. Ainsi l'acier inoxydable, premier matériau utilisé avec succès dans la conception de prothèses de hanche dans les années 50, résulte de décennies d'industrie chimique. Les polyesters ont été utilisés après les années 50, comme prothèses vasculaires. Puis vinrent les plastiques, mais ils soulevèrent un sérieux problème : leur contact avec les fluides du corps favorisait la libération de substances qui pouvaient se révéler toxiques pour l'organisme. Le titane découvert en médecine à la fin des années 1960 par BRANEMARK et coll. (1969) était déjà utilisé dans l'aéronautique. Le poly méthylméthacrylate (PMMA), pour les lentilles intraoculaires, a suivi un cheminement analogue trouvant son origine dans les cockpits d'avions anglais pendant la guerre. Il en est de même pour de nombreux matériaux utilisés de puis longtemps. Dans les années 1970, les chercheurs sélectionnèrent donc plastiques et métaux en fonction de leur toxicité. Les alliages à base de titanes ont été parmi les grands gagnants. Mais, malgré tous leurs avantages, ces biomatériaux ne s'intégraient toujours pas parfaitement au corps humain[3].

Les matériaux des premiers implants ne devaient pas cependant résister à l'usage et il fallut bien vite essayer de trouver des matériaux adaptés. La science des biomatériaux était née et enrichissait le vocabulaire biomédical d'une série de nouveaux mots destinés à définir les interactions entre un organisme vivant et un matériau. L'allongement de la durée de vie et l'exigence de plus en plus grande d'une bonne qualité de vie, ont conduit à une augmentation rapide du nombre de systèmes implantés, tendance qui ne peut que s'affirmer dans l'avenir. De plus, les progrès réalisés dans le domaine permettent des interventions chirurgicales autrefois impossibles ainsi que la conception de nouveaux systèmes mieux intégrés et plus efficaces.[6].

II.2. Définition des biomatériaux

A travers la définition convenue par le consensus de Chester 1991, on peut dire que la matière biologique a une relation directe avec les tissus vivants ou évaluée à travers le résultat des fluides biologiques Pendant le traitement, ou en plaçant des formes d'une autre manière, ou en changeant tout tissu, organe ou fonction liée au corps, tous ces matériaux sont saturés de toutes les propriétés physiques et chimiques appropriées à l'endroit où ils peuvent être plantés, et le but de la fonction qui peut être obtenue a en revanche une correspondance biologique, le terme est donné Biocompatibilité de tous les matériaux qui sont indispensables à l'inéluctabilité de l'acceptation du tissu pour implantation par l'organisme que nous allons implanter à l'intérieur[8].

La science a développé de toutes les manières les matériaux biologiques pour que les personnes souffrant de handicaps chroniques ou d'accidents du travail visent toutes à trouver tous les moyens simples de fabriquer des dispositifs d'assistance physique pour compenser les processus de mouvement de l'organe blessé En ce qui concerne le matériel biologique, il représente actuellement un problème social majeur, plus de 5% de la population de la terre porte des parties contenant du matériel biologique cultivé. Et un préjudice économique important, puisque le coût serait complété d'environ 30 milliards d'euros en 2002. De plus, il y a une différence d'âges pour la moyenne d'âge, et si la situation perdure avec des augmentations effrayantes, la science s'impose pour trouver des solutions aux problèmes biologiques. Des matériaux qui ont une durée de vie plus longue , c'est-à-dire plus de 15 ans [21].

Pour les domaines d'application des matériaux biologiques, la chirurgie reconstructive ou la chirurgie cinétique de remplacement en sont les deux domaines appropriés, notamment les autres spécialités médicales qui utilisent ces matériaux pour s'adapter à toutes les communications biologiques. Tels que les appareils de micro-examen ou l'intervention visuelle [16].

II.3. Les différents types de biomatériaux

Pour les matériaux naturels tels que les métaux et la céramique, ainsi que toutes les utilisations biomédicales, par exemple, dans les pièces synthétiques et les matériaux de revêtement synthétiques, ainsi que tous les composants des matériaux biologiques [7].

A travers tout cela, selon la nature des matériaux, on peut les classer en quatre grandes catégories [17]:

- Les biomatériaux métalliques.

- Les biomatériaux céramiques.
- Les biomatériaux à base de polymères de synthèse.
- Les biomatériaux d'origine naturelle.



Fig (II.1) : schéma de Classifications des biomatériaux [16]

Malgré l'évolution des matériaux au fil du temps, la rentabilité est devenue limitée. Cela est dû à l'apparition de plusieurs signes négatifs qui ne sont pas dans l'intérêt de l'individu, et par l'apparition du phénomène de corrosion des extrémités métalliques due à leur incapacité à résister, comme pour les surfaces de glissement constituées à l'origine des matières plastiques en polyéthylène, elles présentent des déformations, et des deux nous pouvons conclure Limité dans la continuité aussi longtemps que possible. Quant au ciment de méthacrylate de méthyle, il libère des substances toxiques à l'intérieur du corps Il est à l'origine utilisé pour installer des membres prothétiques [14].

Après l'apparition de ces défauts, la chirurgie orthopédique et dentaire a adopté une autre méthode, à savoir l'utilisation de matériaux qui sont à l'origine des matériaux synthétiques tels que les céramiques phosphoro-calciques, qui sont à l'origine utilisées de manière spéciale et vitale. Les prothèses B bass sont utilisées pour remplacer la perte osseuse. Et à travers la nature

des matériaux biologiques, ils sont classés, et comme autre condition, ils sont classés par les caractéristiques qui les caractérisent, et tout cela relève de leur activité vitale [13].

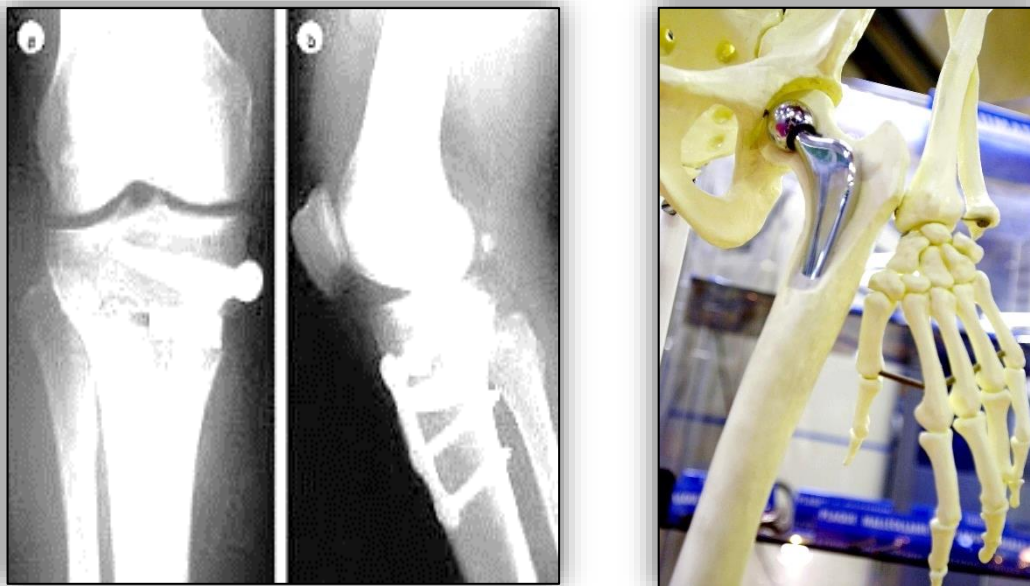


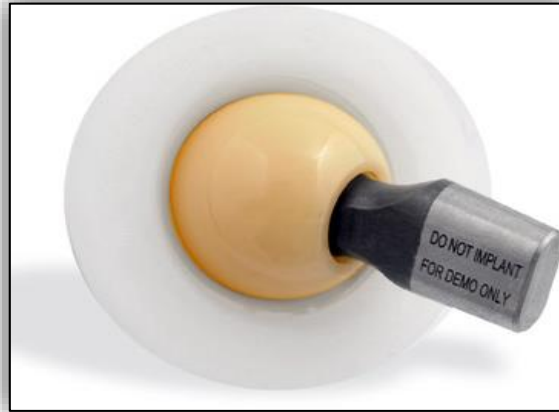
Fig (II.2) : Biomateriaux répertoriés en fonction de leur bioactivité [15].

La capacité d'un biomatériau fabriqué à induire une réponse physiologique qui soutient la fonction et la performance du biomatériau est connue sous le nom de bio activité. Le plus souvent, dans les verres bioactifs et les céramiques bioactives, ce terme fait référence à la capacité des matériaux implantés à bien se lier aux tissus environnants dans des rôles soit ostéo conducteurs soit ostéo productifs. Les matériaux d'implant osseux sont souvent conçus pour favoriser la croissance osseuse tout en se dissolvant dans le fluide corporel environnant. Ainsi, pour de nombreux biomatériaux, une bonne biocompatibilité ainsi qu'une bonne résistance et des taux de dissolution sont souhaitables. Généralement, la bio activité des biomatériaux est mesurée par la bio minéralisation de surface dans laquelle une couche native d'hydroxyapatite est formée à la surface. De nos jours, le développement de biomatériaux cliniquement utiles est grandement amélioré par l'avènement de routines de calcul qui peuvent prédire les effets moléculaires des biomatériaux dans un cadre thérapeutique basé sur une expérimentation. [15].

II.3.1. Les céramiques (Biocéramiques)

La technologie de l'ingénierie des céramiques techniques aide à résoudre de plus de plus de problèmes d'ingénierie dans les domaines mécaniques, électriques, électroniques et médicales avec des applications dans les champs aussi variés que l'automobile, l'électricité, la fabrication, les industries de la consommation et des télécoms.

Le terme céramique recouvre des matériaux non métalliques, non organiques, qui lors de leur préparation subissent un traitement en température appelé frittage. On classe parmi les céramiques de nombreux produits chimiquement très différents [5, 6].



Fig(II.3): Couple céramique / Polyéthylène[1].

a) Les avantages des céramiques

- Les propriétés typiques d'un matériau céramique présentent les avantages suivants :
- Haute résistance à l'usure, à la chaleur, à la pression et aux attaques chimiques (gaz et liquides)
- Dureté élevée
- Très bon isolant électrique
- Matériau relativement léger

Le choix de la matière première s'effectue, au cas par cas, en fonction des performances attendues, tout en optimisant les coûts de fabrication. Les économies sont d'autant plus sensibles que la fabrication est répétitive, même pour un nombre élevé de pièces à produire.

La mise en forme se fait par compaction de poudre, permettant ainsi d'obtenir des pièces proches des dimensions finales, sans usinage. Ceramaret diminue par conséquent le nombre d'opérations secondaires onéreuses. La densification se réalise dans des fours à haute température ($>1500^\circ$) au cours de l'étape de frittage. Des tolérances dimensionnelles ou géométriques extrêmes (de l'ordre du micron) peuvent naturellement être obtenues par un usinage complémentaire, respectivement un enlèvement de matière par abrasion à base de diamant. [12].

b) Les inconvénients des céramiques

Parmi les inconvénients de la céramique, c'est qu'elle est difficile à mettre en œuvre et que sa composition structurale est fragile et capable de se désagréger de manière simple. Et

tous ces ingrédients et leurs propriétés sont le résultat de la composition fine du céramique. Mais d'un autre côté, on peut dire que la structure métallique des métaux est faiblement liée et facile à déplacer, mais ces propriétés ne s'appliquent pas à la céramique car ses granulés ont des liaisons fortes dans des formes complexes [16].

Toutes ces caractéristiques uniques qui caractérisent la céramique font qu'il ne s'agit pas d'un bon transfert de chaleur ou d'électricité. Cependant, les céramiques ont des points de fusion élevés de plus de 1 000 degrés Celsius par rapport aux autres métaux, mais elles sont plus fragiles qu'eux. La couche de phosphate de calcium est la substance qui se forme à la surface du biomatériau pour créer une adhérence osseuse [14].

c) Propriétés et applications des céramiques

➤ Tableau (II.1):des exemples sur biomatériaux céramiques et leur usage[21].

Biomatériaux«Céramiques »	Utilisations
Oxydes d'aluminium	Implants de la hanche, les implants dentaires, remplacement cochléaire
Zircone	Implants de la hanche
Le phosphate de calcium	Substituts osseux, des revêtements de surfaces remplacement total de l'articulation, Échafaudages cellulaires
Le sulfate de calcium	Des substituts de greffe osseuse
Carbone	Revêtements de valve cardiaque, des implants orthopédiques
Verre	Des substituts de greffe osseuse, des charges pour matériaux dentaires

➤ La composition des composants polymère et métal-céramique a été modifiée pour une articulation de hanche artificielle et malaxée pour augmenter la durabilité et renforcer l'adhérence [16].

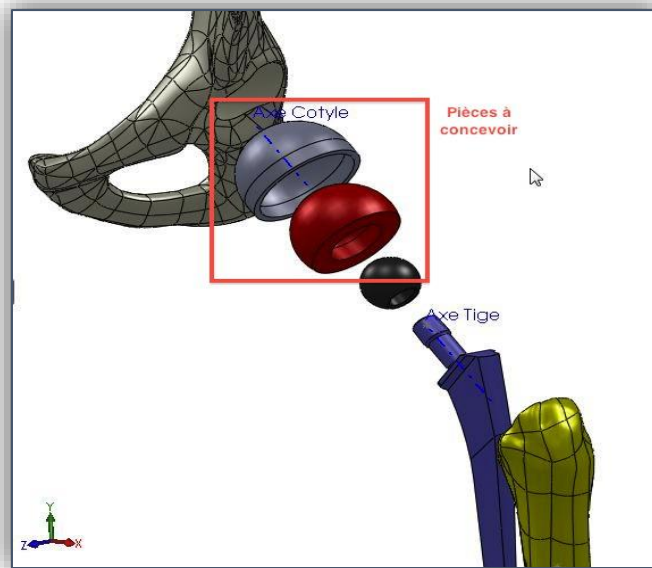


Fig (II.4) : Biomatériaux en céramique (articulation artificielle de la hanche) [5]

- Lorsque la quantité d'os disponible pour le patient ou son donneur n'est pas suffisante ici, le sulfate de calcium peut être utilisé comme greffe osseuse artificielle [13].



Fig (II.5) : Biomatériaux en céramique (sulfate de calcium) [12]

II. 3.2. Les métaux (Biométaux)

Corps conducteur de l'électricité, et de la chaleur, en général malléable et ductile et réfléchissant la lumière (éclat métallique). Au contact d'un acide, un métal donne un sel ; au contact de l'oxygène, il donne un oxyde (avec difficulté pour les " métaux nobles " comme l'or, le platine...). [11].



Fig (II.6) : Les métaux (Bio métaux) [11].

a) Avantages et inconvénients des biométaux

Quant aux métaux qui sont utilisés comme élément de base en tant que biomatériaux, ils présentent les caractéristiques d'une grande résistance à la productivité et d'une résistance à la traction cohésive [11].

- Il est conçu pour résister à la corrosion.
- Il est utilisé comme moyen de remplacer les articulations du genou et de la hanche et de pétrir une large zone d'utilisation.
- Lorsque le cartilage normal est endommagé, les implants réduisent la douleur et restaurent la fonction articulaire.

Les os cassés sont maintenus en place par des plaques métalliques et des vis à rande échelle, et peuvent être laissés ou retirés de leur place en fonction de l'état de récupération du patient. Choisir des alliages de titane, de cobalt et de chrome pour remplacer les métaux facilement corrodés, qui est le point faible des métaux utilisés [9].

b) Propriétés et applications des biométaux

Tableau (II.2): des exemples sur les biomatériaux métalliques et leur usage[11].

Bio matériaux «Métaux »	Utilisations
Acier inoxydable	Remplacement mixte, fracture osseuse fixation, valves cardiaques, des électrodes
Titane et alliages de titane	Joint de Remplacement, revêtements de sur facesur le total Des remplacements Articulaires, échafaudages cellulaires
Alliages cobalt-chrome	Joint de remplacement, fracture osseuse fixation
Or	obturations et les couronnes, les électro des dentaires
Argent	Fils de pace makers ,matériel des future ,les amalgames dentaires
Platine	Électro des, de neurones périphériques stimulations

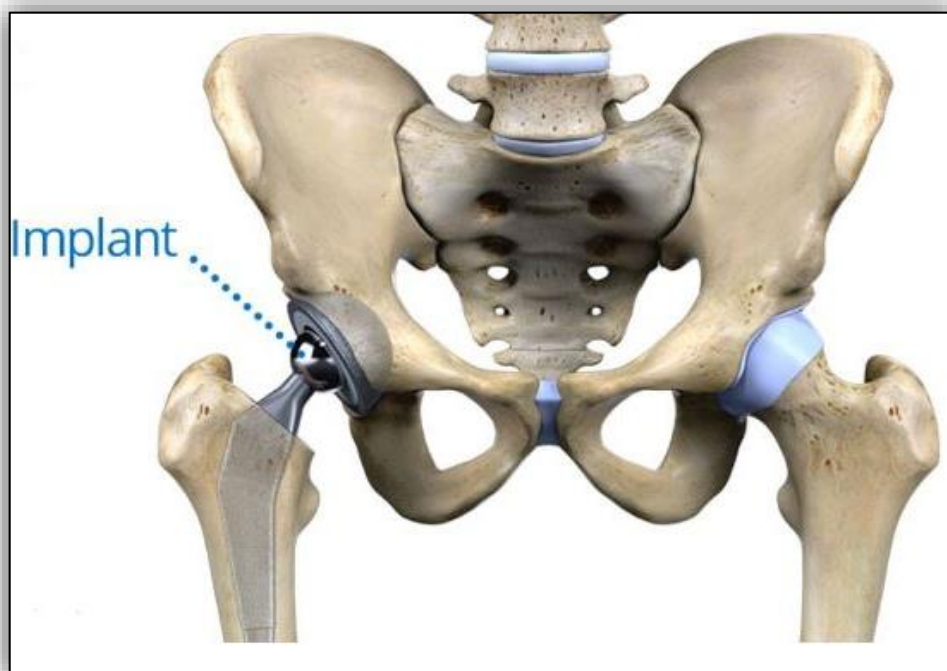


Fig (II.7) : Biomatériaux en Métaux (Prothèses de hanche) [13]

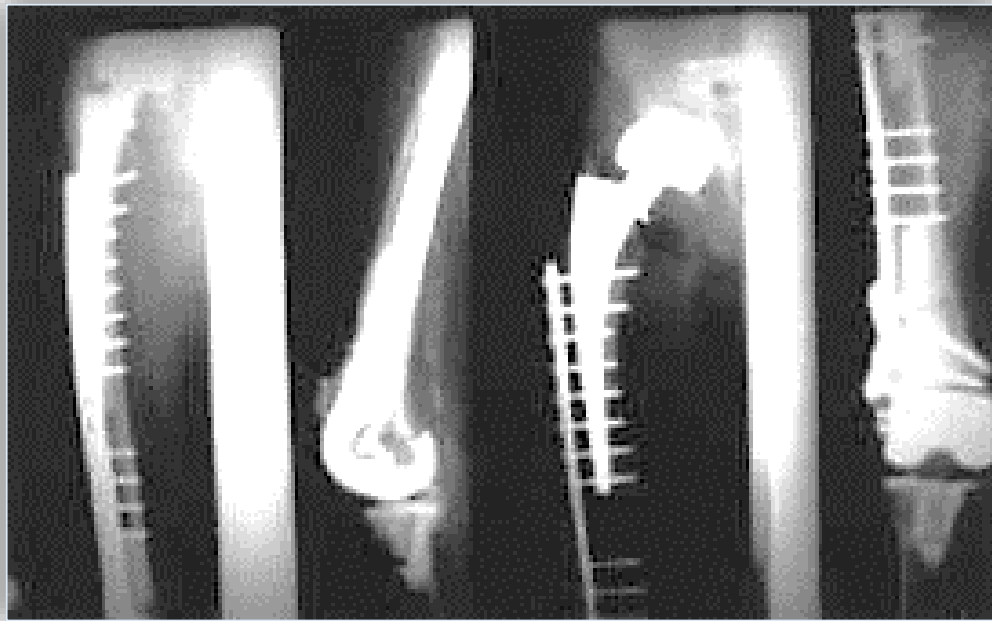


Fig (II.8) : Plaques et vis de métal (images RX ;fractures en orthopédie) [16].



Fig (II.9) : Soudure de vertèbres et racines dentaires. [18].

II.3.3. Polymères (Biopolymères)

Un polymère est constitué de molécules géantes produites par la répétition d'une molécule de base ou monomère. Le nombre de monomères peut aller de quelques centaines à

quelques milliers d'unités par molécule géante. Un polymère peut être fait d'un seul type de monomère ou de deux types de monomères, dans ce cas on parle de copolymère [8, 9].

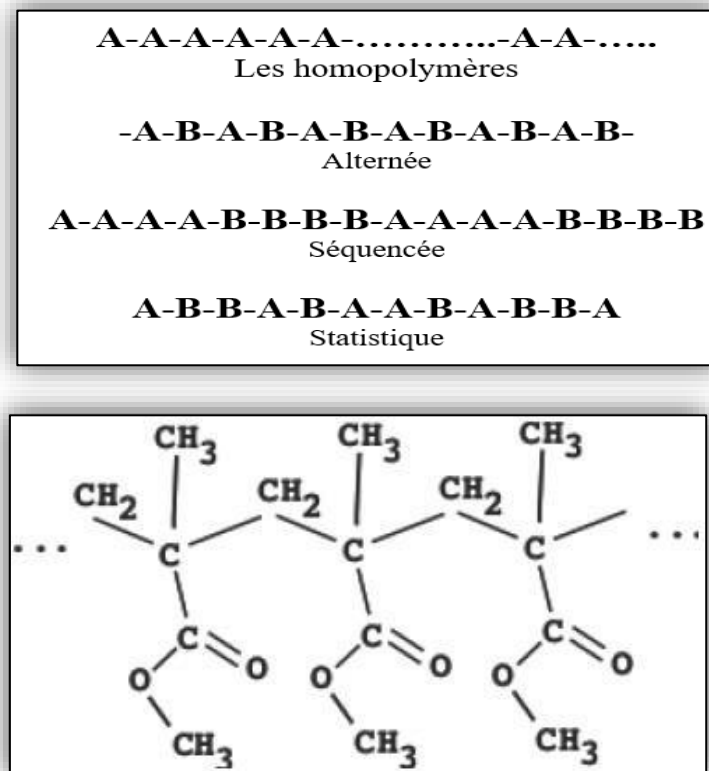


Fig (II.10) : schéma représente la Structure du PMMA [6]

Dans le monde médical, et plus particulièrement dans celui de la recherche, il y a bien longtemps que les plastiques ont gagné leurs lettres de noblesse. Ils y occupent une place de choix depuis de nombreuses années et sont à la source d'innovations déterminantes tant sur le plan purement médical que sur celui du gain en confort de vie et donc de mieux-être... L'histoire entre les polymères et la santé n'est donc pas récente puisque, déjà dans les années 1930, le PMMA (poly méthacrylate de méthyle) faisait son apparition dans les lentilles oculaires, une révolution à l'époque par rapport aux lunettes : plus petites, plus discrètes, plus confortables. Plus récemment, c'est le PEEK (Poly Ether Ether Ketone), un polymère thermoplastique de haute performance, qui est devenu le chouchou des chercheurs. Un matériau solide, radio transparent, biocompatible. Avec une densité proche de celle de l'os, il permet de créer des prothèses et de minuscules implants hautement résistants [9]..

a) Avantages et inconvénients des biopolymères

En raison de la diversité de leurs propriétés constitutives, les polymères sont bien adaptés aux applications biomédicales.

- rigide et souple[10].
- Modifier l'adhésion des protéines ou, au contraire, leur résistance à l'adhésion.
- permanent ou biodégradable.
- Elle a des formes très complexes.

b) Leurs inconvénients par rapport aux biocéramiques et biométaux

- La céramique et les métaux ont une plus grande résistance qu'eux.
- Son état se détériore pendant la phase de stérilisation, ou il peut se déformer avec le temps.
- Il produit des sous-produits toxiques pendant la phase de décomposition catastrophique dans le corps [19].

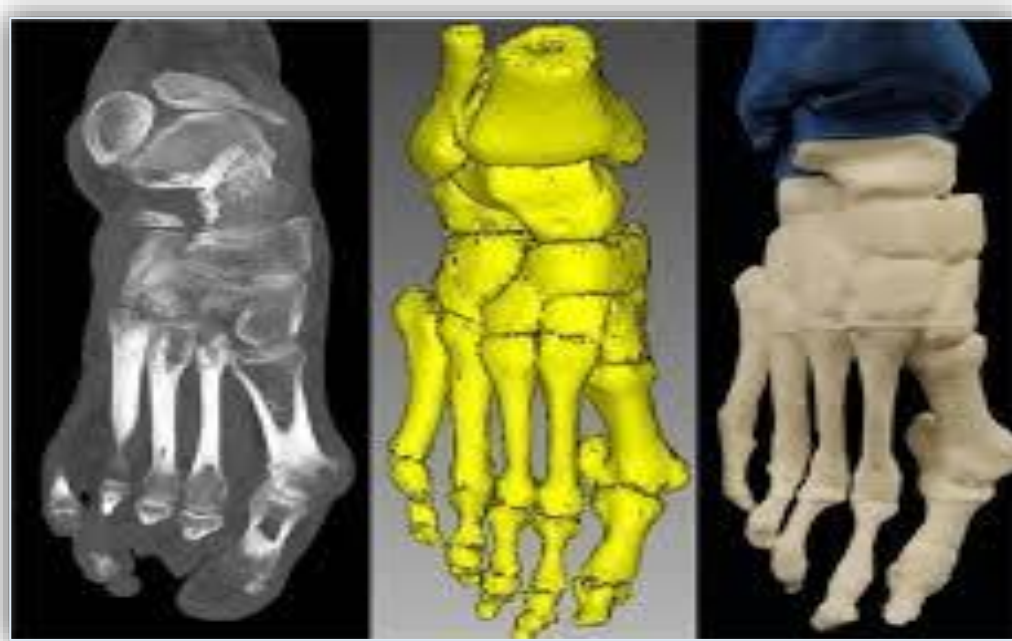


Fig (II.11) : Les Polymères [17]

c) Propriétés et applications des biopolymères

- Les formes sont formées à partir d'un groupe de grosses molécules. L'étape de polymérisation peut être synthétisée à partir des monomères de l'une quelconque des plus

petites molécules.

- Les polymères peuvent être classés selon deux propriétés : thermoplastiques ou en thermodurcissables.
- La facilité de mise en forme et de recyclage des thermoplastiques réside dans le fait qu'ils ont une structure ramifiée ou linéaire. Il peut permettre aux chaînes de glisser facilement permettant au polymère de fondre [4].
- Les molécules de monomères sont liées les unes aux autres pour les rendre plus rigides. D'où les polymères durcis par le facteur thermique sous l'effet de la chaleur lors de leur mise en œuvre. Les polymères durcis ont une structure tridimensionnelle qui se solidifie lorsqu'ils sont chauffés et ne peuvent pas être recyclés [5].
- **Tableau (II.3) : exemples sur les biomatériaux polymères et leur usage [14]**

Bio matériaux «Polymères»	Utilisations
Nylon	Sutures chirurgicales, segments gastro-intestinaux, rubes trachéales
Silicone caoutchouc	Articulations des doigts, la peau artificielle, implants mammaires, lentilles intraoculaires, les cathéters
Polyester	Sutures résorbables, la fixation des fractures, des échafaudages cellulaires, les pansements de la peau, des dispositifs d'administration de médicaments
Polyéthylène(PE)	Hanche et du genou implants, les tendons et les ligaments artificiels, greffons vasculaires synthétiques, les prothèses dentaires, les implants faciaux
Poly methy meth acrylate(PMMA)	Lentilles intraoculaires
Chlorure de polyvinyle	Tubes, protheses faciales

II.3.4. Les Matériaux Composites (Biocomposites)

La médecine fait usage de matériaux soumis à des contraintes très spécifiques. Les matériaux « extérieurs », tels que les pansements, les textiles chirurgicaux, ou les attelles, par exemple, bénéficient des progrès scientifiques actuels. L'emploi de nouveaux polymères et le contrôle des textures apportent toujours plus de légèreté, de confort et d'efficacité.

Mais la médecine moderne fait également un appel grandissant à des matériaux « intérieurs », en contact avec les fluides biologiques, que sont par exemple les prothèses osseuses ou vasculaires, et les dispositifs de contrôle des débits sanguins. La recherche des

propriétés de résistance sur le long terme dans des milieux chimiquement évolutifs, et de plasticité nécessaire à l'utilisation de ces matériaux, nécessite la mise au point de matériaux polymères perfectionnés, rendue délicate par la difficulté des validations in vivo.

Ce secteur de la médecine, guidé par le besoin de nouveaux matériaux, est en forte croissance du fait de la demande accrue du public en matière de santé[18].

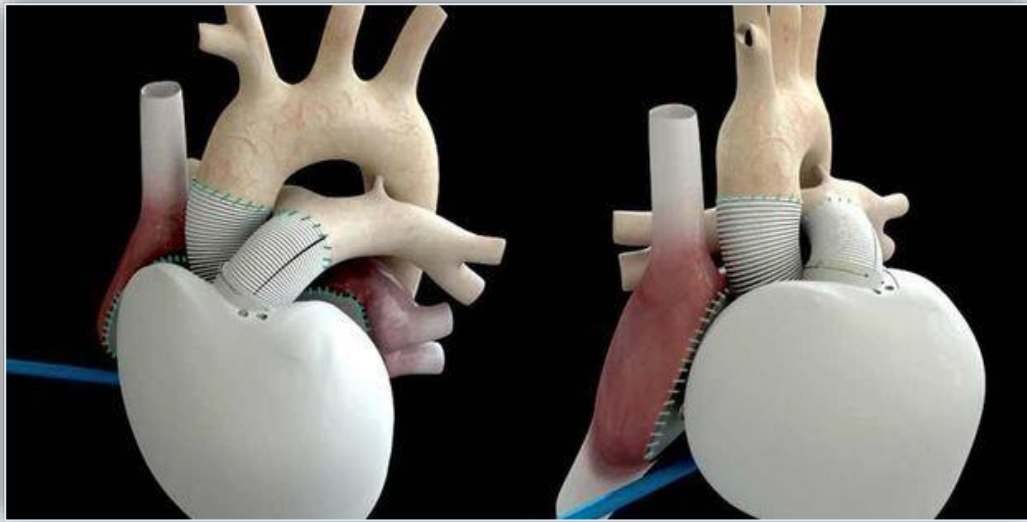


Fig (II.12) : Les Matériaux Composites [12]

➤ les Avantages et inconvénients des matériaux biocomposites

Les matériaux composites sont constitués de deux ou plusieurs parties distinctes. A titre indicatif, une substance pure est constituée de molécules et de granules appelées sous-unités distinctes, quant au terme composé, il s'adresse principalement à des substances ayant une composition chimique distincte séparées par une interface [17].

On peut mettre des matériaux composites en mélangeant au moins deux composants avec leur formation ou en les pressant ou en les faisant interagir chimiquement ensemble.

L'imprégnation et l'enduction des fibres sont réalisées au moyen d'un polymère, avant de procéder au processus de chauffage et de pressage pour atteindre la condensation de l'ensemble. Les biomatériaux conviennent aux composés qui ont plusieurs propriétés. Y compris arthroplastie totale, amalgame dentaire, plaques orthopédiques. Les véhicules présentent de nombreux inconvénients. Le plus important étant de provoquer une diminution des performances mécaniques, c'est-à-dire le risque de dispersion de phase La seconde ou l'incohérence des deux phases, toute interaction faible [2].

II.3.5. Les matériaux naturels

Quant aux substances naturelles, elles sont synthétisées par un organisme vivant ou une plante. Ce sont des matériaux synthétiques chimiquement et structurellement complexes.

Les protéines et les polysaccharides sont les formes naturelles des polymères [8]. D'excellentes propriétés mécaniques sont prises en compte par les liaisons directionnelles dans les protéines. Parce que la résistance à la traction marginale de la soie naturelle est supérieure à celle du nylon et que son module d'élasticité est 13 fois supérieur. Le nylon est l'un des polymères synthétiques les plus résistants [4].

Il existe un type de céramique naturelle à base de calcium, comme le phosphate de calcium provenant de cristaux d'os, et contient également du carbonate de calcium provenant de coraux et de coquillages [3].

- La fritte naturelle est plus solide et résistante à la rupture que la céramique industrielle, et cela est dû à sa microstructure hautement cohésive, qui est l'un des facteurs qui empêchent la propagation des fissures.
- Grâce à une matrice organique plus résistante, les cristaux de céramique sont séparés et disposés de manière précise et homogène.
- Ces matériaux comprennent des tissus donnés de la peau et des os, que nous pouvons obtenir du même patient, ou même d'autres espèces telles que les vaches et les porcs, appelés greffe étrangère, ou d'une autre personne appelée greffe cachée [16].

Biomatériaux «Naturels», Le collagène et la gélatine, La chitine, Céramique ou céramique déminéralisée, Alginate, L'acide hyaluronique [6].



Fig (II.13) : Les Matériaux Naturels [15]

A. Définition des matériaux Natural

Un matériau est une matière d'origine naturelle ou artificielle que l'homme façonne pour en faire des objets. C'est donc une matière de base sélectionnée en raison de propriétés particulières et mise en œuvre en vue d'un usage spécifique. La nature chimique, la forme physique (phases en présence, granulométrie et forme des particules, par exemple), l'état de surface, des différentes matières premières qui sont à la base des matériaux confère à ceux-ci des propriétés particulières.



Fig (II.14) : Les Matériaux Naturels [15]

B. Les Avantages et inconvénients des matériaux naturels

Les matériaux naturels présentent plusieurs avantages, dont le plus important est la faible incidence de toxicité ou d'inflammation.

Parmi les inconvénients majeurs figure son prix de revient, difficile à produire et à isoler.

Si les matériaux naturels ont des propriétés variables dans différents lots, il est difficile de maintenir la cohérence et cela peut être un problème pour leur large commercialisation.

Les solvants sont utilisés pour extraire le composant requis du reste des tissus, ou au contraire, pour éliminer le reste et garder le matériau naturel intact, en suivant les étapes de purification ou d'isolement [15].

C. Propriétés et applications des matériaux naturels

a) Le collagène peut être fabriqué par les deux méthodes

- Du traitement enzymatique avec de la pepsine de comprimés de cafards, nous extrayons du collagène soluble.
- Après avoir effectué plusieurs opérations d'extraction pour éliminer les protéines et les molécules non colla géniques, le collagène fibreux est préparé à partir de tissus normaux tels

que les tendons [15].

b) Certains bio polymères sont produits par des bactéries. Prenons l'exemple du poly hydroxy butyrate (PHB) : les bactéries produisent un polymère sous forme de granules dans leur cytoplasme par fermentation [14].

c) Le PHB se décompose en un groupe de composés naturels du même type dont le corps humain est constitué et possède des propriétés similaires au polyéthylène et au poly propylène [11].

d) Du processus de polymérisation des monomères naturels, nous dérivons certains bio polymères [2].

e) On peut considérer qu'il n'est pas produit directement par des organismes vivants, mais qu'il est dérivé de monomères naturels et est considéré comme les éléments de base à partir desquels il est produit, ce qui le rend biodégradable, non toxique et biocompatible[2].

f) Dans l'ingénierie tissulaire biodégradable et les sutures, les polymères à base d'acide lactique C₃H₆O₃ sont largement utilisés[4].

g) Tableau (II.4):exemples sur les biomatériaux naturels et leur usage [5]

Bio matériaux« Naturals»	Utilisations
Le collagène et la gélatine	La chirurgie esthétique, pansements, ingénierie tissulaire, échafaudage cellulaire
La chitine	Plaies pansements, échafaudage cellulaire
Céramique ou céramique déminéralisée	Greffon osseux substitut
Alginate	Cellule encapsulation
L'acide hyaluronique	La prévention des adhérences post-opératoires, lubrifiant ophtalmique et orthopédique, échafaudage cellulaire

II.4. Conclusion

Toutes les recherches et études en cours et approfondies visant à faire durer le corps humain le plus longtemps possible, c'est pourquoi les médecins et les chercheurs ont affirmé que la substance biologique est la plus efficace et la plus sérieuse. La science des matériaux avec le passage du temps et le besoin est en développement constant, et pour cette raison, des conditions ont été fixées pour cela, y compris la formation continue de spécialistes à qui connaissent bien tous les détails du corps humain et tous ses besoins et connaissent les matériaux. Par conséquent, on peut dire que le domaine des sciences biomédicales est un

vaste domaine, et chaque jour de nouvelles choses sont découvertes qui vise à augmenter la durée de vie du navire.

CHAPITRE III

LES BIOCERAMIQUES

III.1. Introduction

Le mot assemblage est souvent associé à la réparation des os (hanche, genou, etc.). C'est un appareil médical qui est intégré de façon permanente dans le corps pour remplacer ou remplacer les tissus endommagés. On appelle ce matériau le biomatériau, terme qui définit tout objet ou substance qui est constamment cultivé dans un organisme, qu'il soit vivant, naturel (par exemple, le corail) ou artificiel. Ainsi, les biomatériaux peuvent être utilisés pour développer d'autres types de matériel médical implanté de façon permanente, que ce soit à des fins de diagnostic, de rééducation ou de remplacement [1]

- Remplacement de valves cardiaques,
- Dispositifs d'injection pour les chimiothérapies (boîtiers de perfusion),
- Implants dentaires,
- Matériau de comblement osseux... [12]

Donc ces biomatériaux doivent être conçus pour pouvoir interagir avec des tissus vivants et avoir des propriétés "biologiques". La première de ces propriétés, minimum et fondamental, est la biocompatibilité. En d'autres termes, la substance ne doit pas être toxique pour la texture hôte ou provoquer des réactions indésirables et/ou négatives [14].

Ici, nous allons nous concentrer sur les matériaux essentiels pour les applications qui ont à voir avec le squelette et les os qui l'composent. L'os est un beau tissu. Il peut être considéré comme un composé. Ils vivent parallèlement par les cellules et leurs sécrétions, qui les forment et les présentent, et ils sont métalliques par le phosphate de calcium qu'ils déposent autour d'eux et lui donnent ses propriétés de « tissus solides » Le squelette est un organe qui accomplit de nombreuses fonctions importantes pour le corps et participe à la fonction de locomotive des vertébrés. Elles ont un rôle dans la protection des organes vitaux (cerveau, moelle épinière du crâne, colonne vertébrale). voies respiratoires cardiaques par rapport à la cage thoracique). Enfin, elle participe activement au contrôle, au niveau de l'organisme, de l'entretien et de l'organisation des stocks de minéraux, y compris le calcium, nécessaires au fonctionnement des cellules. Ce seul appareil est entièrement régénérateur. En fait, après la lésion, le tissu cimenté de la cicatrice qui s'est formée, vivant et miné, est exactement identique au tissu initial [19].

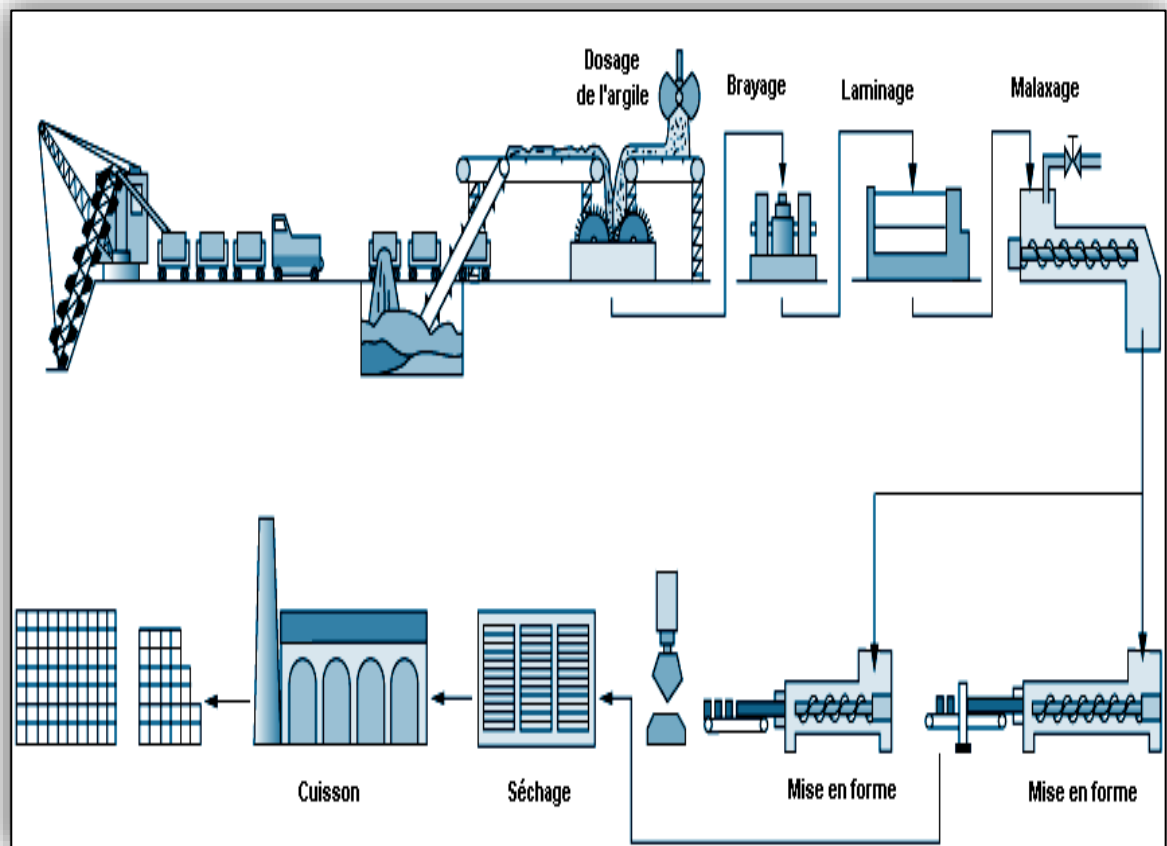
III.2. Classe des biocéramiques

La biodynamique relève de la définition des substances biologiques; Ce sont des céramiques (du *kéramicos* grec, de « boue moulée bouillonnée ») qui sont basées sur des

matériaux métalliques, non métalliques et inorganiques et qui peuvent être utilisés soit en tant que ensemble soit dans le cadre d'un système visant à traiter, déployer, déployer ou remplacer tous les tissus ou organes du corps humain. Un rapport de décembre 2006 montre que les ventes mondiales de bestiaux d'biomatériaux se sont élevées à près d'un million de dollars en 2006 et devraient augmenter de 9% par an de 2006 à 2012 [13].

III.2.1. Élaboration et mise en œuvre des biocéramiques

Les bio-cultures sont réalisées à l'aide de techniques d'implémentation courantes pour tous les types de céramique. La seule différence réside dans les matières premières très pures utilisées et les prescriptions en matière de vaccination telles que l'état de surface ou la stérilité. Le diagramme général de la fabrication de céramique se compose de plusieurs étapes, comme indiqué dans la figure 1. La préparation de la matière première peut se faire en trois étapes [5]



Fig(III.1) : Élaboration et mise en œuvre des biocéramique

a) a préparation par voie solide

Les matières premières à poudre (oxydes, carbonates et nitrates), qui sont mélangées au sol avant d'être assemblées ou calculées, sont utilisées. Ce dernier consiste à subordonner les

matières en suspension à un cycle thermique au cours duquel elles interagissent et forment la phase cristalline souhaitée par les phénomènes de propagation dans la phase solide [6].

b) La préparation par voie chimique sous pression atmosphérique normale

Il s'agit de configurer les exigences ou les rôles à partir d'une solution homogène avec des disques souhaités, puis de calculer ces exigences pour former la phase et la microarchitecture souhaitées. Dans la plupart des cas, cette méthode de synthèse permet d'obtenir des poudres dont les caractéristiques (exactitude, homogénéité, malveillance, etc.) sont clairement supérieures à celles obtenues par la mise à l'échelle [14].

III.2.2. La structure cristalline

Selon les conditions de préparation, le même produit chimique peut avoir des structures cryogéniques et cristallines différentes, ce qui modifie sa solubilité. Par exemple, les phosphates tricalciques peuvent avoir deux structures cristallines différentes : la structure cristalline à six branches de l'hydroxyapatite $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$, qui fait partie de la famille des orthophosphates de calcium. Le cristal, qui reflète la taille et la taille des cristaux, change aussi la solubilité de la céramique. Les cristaux de petite taille ou les puces de la grille se dissolvent plus rapidement qu'un grand cristal ou qu'un parfait cristal [16].

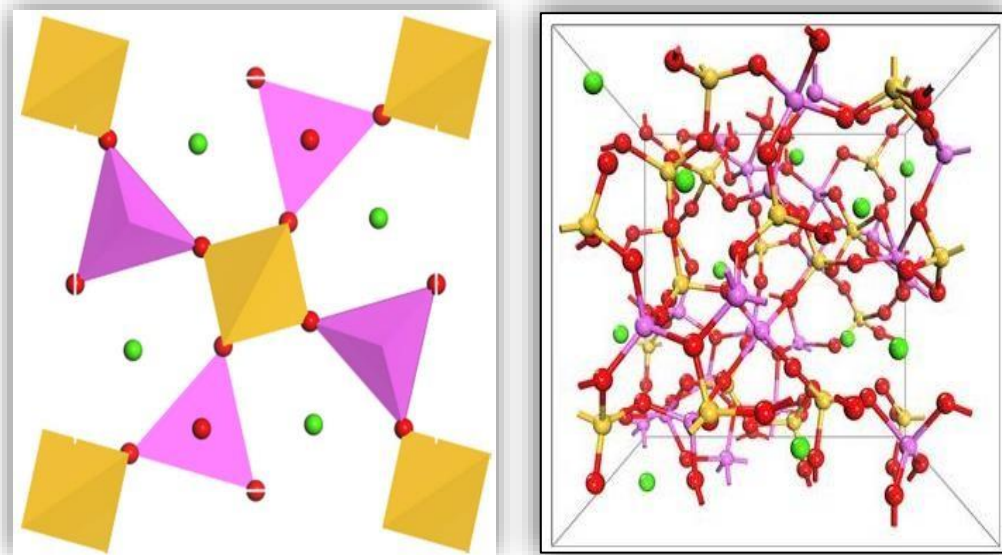


Fig (III.2) : Structure cristalline [8].

le système hexagonal avec le contrat de réseau et le diagramme de droite hydroxyapatite avec du calcium noir à la première place et du calcium blanc à la deuxième place; La structure est concentrée sur les visages des Zirconiens [6].

III.3. La porosité

La porosité est la propriété principale d'une substance biologique, en particulier dans le cas d'un appât, comme le phosphate de calcium. Dans des conditions de préparation, deux sortes de punaises coexistent dans la céramique, la macro épaisseur et la fine épaisseur. La porosité totale entraîne la présence de pores étalonnés, créés par l'ajout d'un facteur poreux pendant la radio. Son diamètre va de 100 à 600 μm et il est souhaitable de le coloniser selon une structure cellulaire, comme indiqué dans la figure 4 [12].

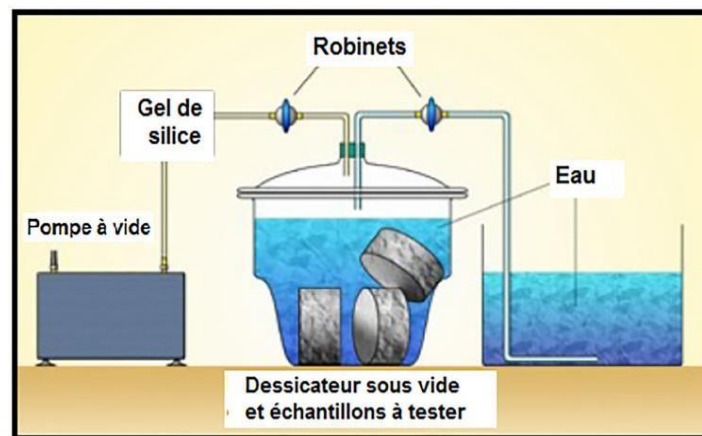


Fig (III.3) : système de mesure de la porosité

Dans la céramique, le phosphate de calcium, selon HAUSSELLE. J., PhD Thesis, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne, Science et Génie des Matériaux (2007). Cependant, l'augmentation de la porosité modifie les propriétés mécaniques de la céramique et l'limite à l'usage des sites externes, ou en l'associant à un système orthopédique parfaitement stable. La porosité supérieure de 40 % à 565 000 a permis la colonisation de nouveaux os et l'invasion de tissus adéquats, tout en maintenant la résistance mécanique nécessaire [10].

III.4. La forme physique

Les propositions sont adaptées aux besoins de la chirurgie orthopédique : Les microbes ou blocs nécessaires pour remplir les structures osseuses et les masses nécessaires pour réaliser la sclérose en arthropodes. Il convient de noter que ces blocs peuvent être divisés dans le champ d'application pour s'adapter aux besoins spécifiques d'intervention. Les bio marqueurs sont principalement utilisés pour le remplissage de la tête et du torse avec le PTH [8].

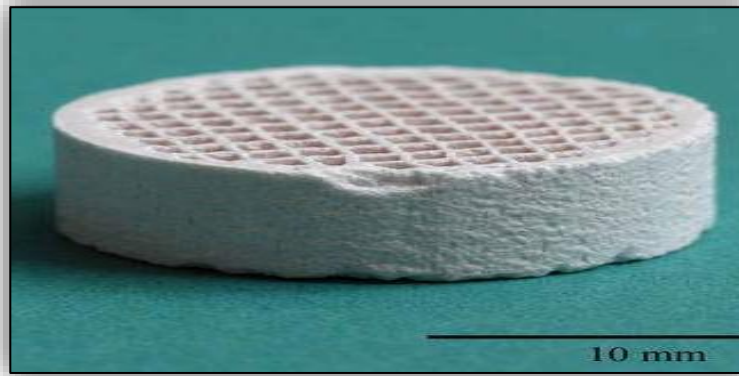


Fig (III.4) : exemple de La forme physique d'un biocéramique

III.5. Propriétés biologiques fondamentales

la céramique poreuse totale possède plusieurs caractéristiques biologiques fondamentales: Biocompatibilité, activité, reproduction osseuse et bio reproduction. [16]

a) la biocompatibilité

Il est aussi connu sous le nom d'intégration de tissus, une condition sine qua non pour la caractérisation du fonctionnement fonctionnel et de la capacité à utiliser de la céramique dans un environnement biologique sans effets nocifs sur l'environnement biologique dans lequel elle doit opérer [7].

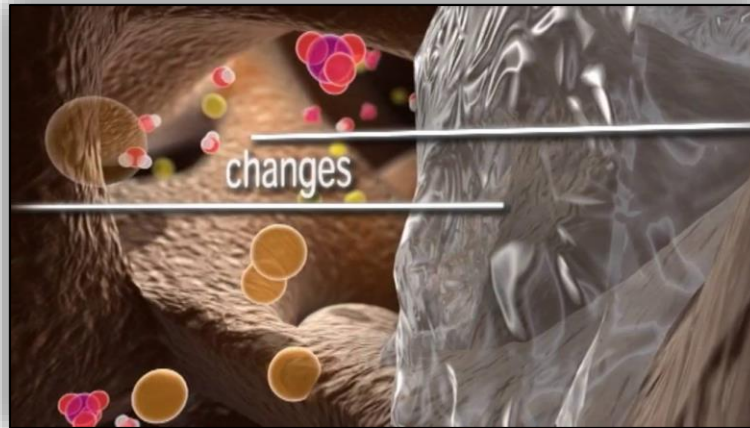


Fig (III.5) : la biocompatibilité d'un biocéramique [16]

b) La bioactivité

Il s'agit de la propriété permettant de créer des liaisons « chimiques » au sein d'un document ARM/hôte. Il s'agit d'échanges permanents entre les sites osseux et les tissus vivants environnants; Plus précisément, elle représente la possibilité d'une interaction et d'échanges favorables avec les cellules et les tissus périphériques, ainsi que la possibilité d'une modification biologique. Dans le cas d'une interface avec une biomatériale active,

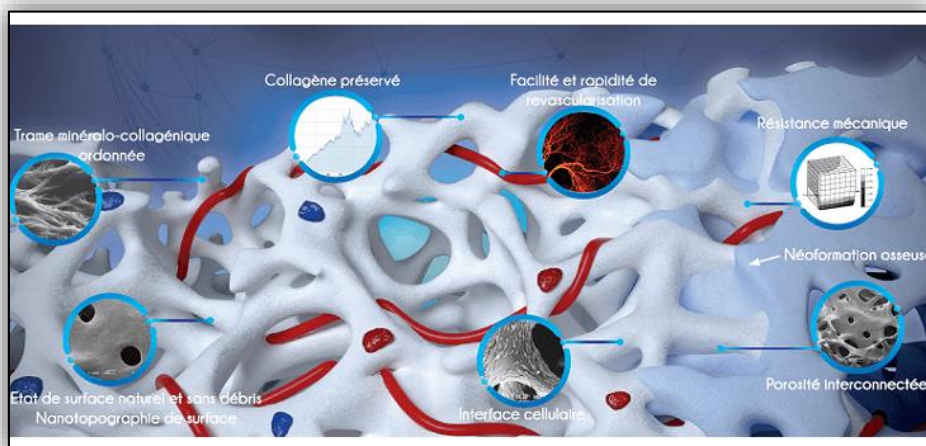
l'interconnexion est assurée par une série d'interactions physico-chimiques à l'interface d'un tissu cultivé/hôte. Ce type d'interaction est appelé biophilie. Il existe une formation de capsule fibreuse non adhérente, appelée type d'interaction « fixation morphologique » [16].



Fig(III.6) : La bioactivité [15]

c) L'ostéoconduction

C'est une propriété négative du matériau pour une rebond osseuse, par la congestion des vaisseaux sanguins et cellulaires du tissu osseux qu'il perçoit en liaison avec ce matériau. En fait, grâce à leur structure poreuse totale, la céramique a la capacité de coloniser le tissu osseux. S'il y a une communication intime entre la matière vitale et l'os récepteur en l'absence de mouvement à l'interface de l'os/de l'implant, l'occultation osseuse peut se faire par des phénomènes cellulaires de la colonisation de l'os. La dynamique biologique présente des propriétés de squelette ou de squelette. La fertilité osseuse est la capacité à catalyser la différenciation des cellules sur une matrice osseuse qui est accessible aujourd'hui. D'autre part, un ostéosarcome correspond à la formation d'un noyau par des cellules osseuses, qui sont des récepteurs de l'os [13]



Fig(III.7) : L'ostéoconduction [13]

d) la biofonctionnalité

Une fois que les exigences fondamentales en matière de biocompatibilité et d'activité ont été satisfaites, le remplacement des os doit remplir une fonction. Par exemple, une céramique phosphacique est placée pour remplir un défaut dans les os ou permettre la fusion des os entre deux banques. Ils doivent d'abord avoir des propriétés mécaniques suffisantes pour maintenir leur structure poreuse durant la phase de « réparation des os ». À ce stade, les propriétés mécaniques de l'implant composite (os de céramique moderne) seront très proches des caractéristiques osseuses et le risque d'échec clinique sera faible. Pour ce faire, il est essentiel d'améliorer les propriétés mécaniques primaires de la céramique [12].



Fig(III.8) : la biofonctionnalité [12]

III.6. Principales applications biomédicales des biocéramiques

L'aluminium et l'arsenic se trouvent principalement dans les têtes de hanche, ainsi que dans la dentisterie pour la transplantation de dents. Il convient de noter en particulier les utilisations et les évolutions de deux céramiques à base de phosphate de calcium: Hydroxyapatite (PAH) et phosphate tricalcium (TCP) pour remplacer les os. La céramique est utilisée pour d'autres prothèses telles que celles sur l'épaule ou le genou. Pour un cou de cuisse d'un alliage de Fer aujourd'hui, la robe peut être d'environ 10 mm par an, alors qu'en Alumina, elle n'est que de 100 mm[10].

En fait, ces matériaux ont l'avantage d'être inertes sur les os, c'est-à-dire qu'ils favorisent la récupération des os par contact et par colonisation; Environ 65 % de la composition du tissu osseux est une forme relativement inconnue de phosphate tricalcium et sa formule chimique est toujours similaire à celle de l'hydroxyapatite (HA), mais sa position spatiale est nettement différente puisque les cristaux d'hydroxyapatite sont liés aux fibres de collagène. En outre, les matériaux de porcelaine perméables basés sur le TCP sont biodégradables. Le principal problème avec HA est de pouvoir synthétiser HA avec seulement

la taille appropriée de pores pour que l'occupation soit bonne. Il y a donc des usages du HA pour la transplantation de dents et de motifs et pour la chirurgie orthopédique. Même les navires synthétiques construits sur le HA endommagé ont été construits [9].



Fig (III.9) : applications biomédicales des biocéramiques [18]

III.7. Application clinique : dans un système de prothèse totale de hanche

Les membres artificiels les plus courants sont ceux qui possèdent un alliage de titane ou de cobalt de chrome fixé sur le tronc de la cuisse de titane. Ce système est spécifié dans la Coupe BFA fixée à la hanche. Les épaves de polyéthylène sont produites par friction avec la tête. Cela entraîne la dégradation osseuse du fémur et limite la durée de vie de la rate. Le port du polyéthylène peut atteindre quelques millimètres dans une décennie. Par conséquent, les têtes métalliques sont de plus en plus remplacées par des aluminas ou des arcènes. Et comme cette céramique est très solide, elle peut être corrigée plus facilement. Certains produits comportent une rugosité inférieure à cinq nanomètres [19]. Le total de la hanche artificielle se compose de trois ou quatre parties comme indiqué dans la figure; Certaines sont attachées à l'os, à la cuisse et à l'aquarium, d'autres sont liées entre elles. Le minerai (alliage éventuellement différent, fondé sur le chrome - cobalt Ou Les derniers matériaux développés visent à réduire l'uniforme progressif de la teinture artificielle par la céramique, à améliorer l'attachement osseux (titane ou hydroxyapatite) et à éviter la décomposition (double-coupe motrice). Les peintures d'hydroxyapatite sur l'alliage de titane Ti-6Al-4V ont de nombreux intérêts dans les domaines de la chirurgie osseuse ainsi que de la transplantation dentaire. Ti-6Al-4V possède de bonnes propriétés mécaniques et une biocompatibilité de sorte qu'une liaison avec l'os soit établie quelques semaines après la transplantation. Les propriétés mécaniques d'hydroxyapatite sont faibles, mais la réduction des os et la biocompatibilité de ce

matériau sont exceptionnelles. Il a été démontré que le lien entre hydroxyapatite et os est plus fort que celui entre titane et os [11].



Fig (III.10) : Biocéramiques dans un système de prothèse totale de hanche [11]

III.8. Les matériaux actuellement implantés

Les conditions de base pour la guérison osseuse sont définies par P. Gianoudis sur la base de la biologie des tissus osseux. Il s'agit de la nécessité d'un environnement mécanique stable (matrice) et de cellules osseuses (précurseurs ou cellules souches), une matrice osseuse (cette propriété indique que les substances consommées par les cellules sont capables de ne pas interférer avec leur physiologie naturelle : Les personnes âgées peuvent s'accrocher à leurs cellules, se reproduire et se distinguer de la surface) et les inciter à se motiver (c'est-à-dire à inciter à utiliser des précurseurs et à les différencier en cellules osseuses fonctionnelles matures). Par conséquent, les implants devraient dans l'idéal être biocompatibles, ostéogéniques et motivés par l'os. De plus, leur irritation est une condition sine qua non de la réparation du tissu osseux. En effet, la circulation sanguine permet l'activation des tissus, le transfert de molécules actives pour communiquer entre les cellules (facteurs de croissance), la contribution des précurseurs cellulaires, l'élimination des déchets métaboliques[11].

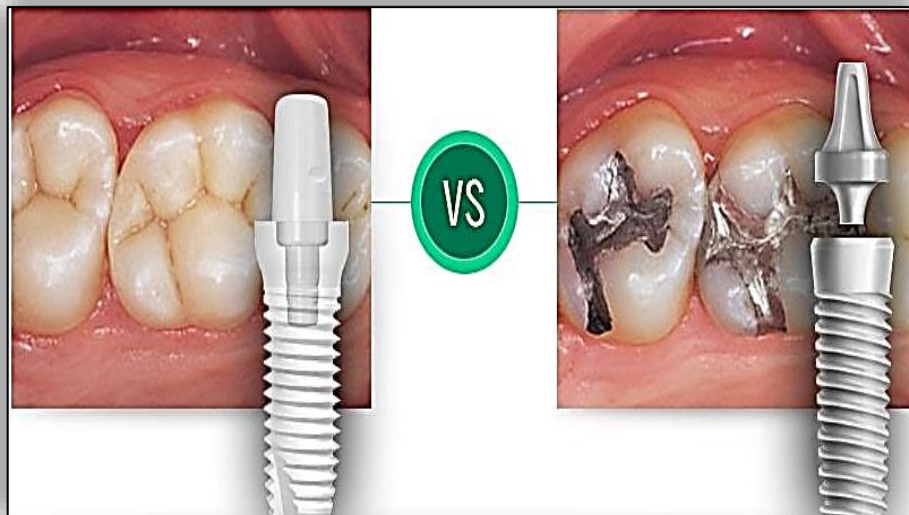


Fig (III.11) :Les matériaux actuellement implantés [14].

Les neurones coagulants, nerveux, motrice, qui contiennent des cellules osseuses, ostrapascellar autogreffe, l'intérieur de l'os, porosité, restent la solution la plus facile, mais ils ont d'importantes limites en ce qui concerne la quantité d'appâts disponibles, ainsi qu'une supplémentaire arthroplastie associée au prélèvement d'os sur le site du donneur. L'utilisation d'os de banques (os dénués d'aspect vivant), et donc par un donateur (ou enthousiasme), est également courante mais moins efficace. Une troisième catégorie de saveur, de nègres ou de greffes métalliques, prises d'une autre espèce humaine (par exemple, porc, bœuf de vache) sous forme d'appareils médicaux unifiés (Bio-OS, granules, produit par l'os de bovin). Les allograft et zenograft présentent également des risques, en particulier le rejet et la contagion, et ne permettent pas de traiter les défauts majeurs. De plus, l'absence de stockage augmente le risque d'échec de la procédure. Ces restrictions incitent à utiliser des substituts orthopédiques [13]. Les matières des deux premières générations sont utilisées en médecine. Selon le contexte clinique du patient, les applications seraient différentes et le choix d'une matière sur l'autre serait basé sur cette matière[14].



Fig (III.12) : Les matériaux actuellement implantés [8]

Le CPCs a été utilisé en ostéologie depuis le début des années 1980 sous diverses formes pour combler des lacunes osseuses. De nouveaux processus informatisés de conception et de fabrication des additifs ont donné lieu à la création de structures complexes dans de nouvelles applications de ces matériaux. Ces processus comprennent la lithographie en pierre, qui consiste à créer une couche après couche d'un modèle informatique, d'une paperasse ou d'une connexion automatique, qui ressemble à l'impression 3D. Par exemple, une étude menée dans Limoges CHU, en collaboration avec les équipes de recherche 3DCéram, a conduit à l'introduction de couches céramiques à base d'hydroxyapatite dans de nombreux patients. Ces patients souffrent de pertes importantes (plus de 100 cm²) et d'os complexes.

À partir du fichier scanner du patient, le modèle informatique de la transplantation est défini, en tenant compte des restrictions de production de matériaux de portraits, et cette partie est formée par lithographie stéréoscopique. Le résultat est un morceau créé sur mesure qui peut être transplanté. D'un point de vue architectural, les parties sont denses au centre, afin d'obtenir une force mécanique adéquate, poreuse autour des bords pour affaiblir le processus de représentation osseuse de l'implant en colonisant les cellules osseuses au contact. Une étude rétrospective des résultats obtenus après la greffe de 19 patients a montré que 72,2 % des patients présentaient une intégration complète à l'os transplanté. La protection du cerveau a permis une guérison neurale avec une esthétique parfaite [8].

III.9. Conclusion

La recherche permettant le développement de biomatériaux destinés à la médecine régénérative osseuse est une discipline très dynamique en pleine évolution. Des stratégies rationnelles basées sur une compréhension fine des interactions existant entre la matière et le tissu vivant sont primordiales. La maîtrise de la production, de la composition chimique à la

structure des matériaux utilisés, est évidemment indispensable. La prise en compte de paramètres liés à la complexité du vivant, à la multiplicité et à la différence des comportements des cellules qui le composent est aussi nécessaire. L'ensemble de ce développement repose donc sur l'existence d'un dialogue constant et d'une synergie entre chercheurs de différentes disciplines et démontre la transdisciplinarité et le dynamisme de ce sujet.

CHAPITRE IV
TECHNIQUES
EXPÉRIMENTAL
(ELABORATIONS,
CARACTÉRISATIONS)
ET DISCUSSIONS

ملاحظة

بعد وباء فيروس كورونا الذي اجتاح العالم، وخاصة الجزائر، تسبب في ركود في جميع الميادين، سواء كانت اقتصادية أو سياسية أو حتى علمية. وبالتالي، فإنه يشكل عقبة أمام إجراء البحوث التطبيقية في مختبر الجامعة وفي المختبرات الخاصة على حد سواء.

لذلك، اخترنا عمل الدكتور **حناشي بوزيد**، الذي يحمل جميع البيانات النظرية أو المطبقة والخبرة في هذا المجال ونتائجه حقيقية

Observation

Après la pandémie de coronavirus qui a balayé le monde, en particulier l'Algérie, a entraîné une récession dans tous les domaines, qu'ils soient économiques, politiques ou même scientifiques. Par conséquent, elle constitue un obstacle à la conduite de la recherche appliquée à la fois dans le laboratoire de l'Université et dans les laboratoires privés.

*Par conséquent, nous avons choisi le travail du Dr : **Hannachi Bouzid**, qui porte toutes les données, théoriques ou appliquées et expérimentées dans ce domaine et ses résultats sont réels.*

IV.1. Introduction

Pour expliquer le but de cette étude, nous avons suivi la méthodologie suivante :

- Techniques d'élaboration ;
- Techniques d'observation tel que microscopie électronique à balayage (MEB) ;
- Techniques d'analyse tel que diffraction des rayons X (DRX), spectroscopie infrarouge FTIR [1] ;
- Technique de caractérisation tribologique.

Et il est difficile de réaliser toutes ces technologies, du moins à partir de cette expérience. Nous avons donné un bref aperçu de ces expériences scientifiques, compte tenu de l'importance des résultats obtenus, nous avons développé cette partie de l'étude pour expliquer les différentes techniques de développement et d'observation par SEM, neutralisation DRX et spectroscopie infrarouge FTIR [14].

IV.2. Définition de la gibbsite

La gibbsite est une espèce minérale de formule chimique $\text{Al}(\text{OH})_3$ avec des traces de Fe et Ga. C'est un important minéral d'aluminium et l'un des trois minéraux qui constituent la bauxite avec la boehmite AlO et le diaspore AlO . Les rares cristaux pseudo hexagonaux peuvent atteindre 3 cm.

Classe cristalline et groupe d'espace : prismatique

Classe de Dana : 6.3.1.1 Oxydes; 6. Hydroxydes et oxydes (avec hydroxyl); 6.3.1.1 Gibbsite g-
 $\text{Al}(\text{OH})_3$

Fluorescence ultraviolet : Luminescent, fluorescent

Formule chimique : $\text{Al}(\text{OH})_3$

Masse molaire : $78,0036 \pm 0,0011$ uma; H 3,88 %, Al 34,59 %, O 61,53 %

Solubilité : insoluble dans l'eau



Fig (IV.1):La Gibbsite[7].

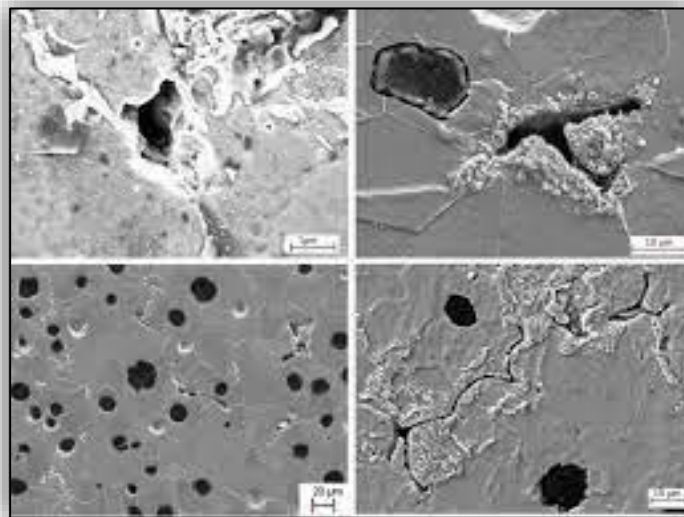


Fig (IV.2) : Micrographies MEB de la Gibbsite[8].

IV.3. Modes d'élaboration

La couche de type gibbsite constitue également le « plan de base » de la structure du corindon Al_2O_3 . La structure de base est la même, les ions hydroxydes étant remplacés par des oxygènes. L'oxygène portant une charge $+II$, les feuillets ne remplissent plus la condition d'électro neutralité, ce qui induit la présence d'ions aluminium entre eux comme compensateurs de charge.

La gibbsite est intéressante parce qu'elle est souvent rencontrée comme sous-partie de la structure d'autres minéraux. Ainsi les feuillets neutres d'hydroxyde d'aluminium se rencontrent entre des feuillets de silice dans des minéraux argileux comme l'illite, la kaolinite, la montmorillonite. Ils sont identiques aux feuillets rencontrés dans la gibbsite.

Pour élaborer la gibbsite il faut suivi les étapes suivantes

IV.3.1. Calcination

Pour provoquer la formation d'alumine- α par la mise en service de La gibbsite $Al(OH)_3$ a été utilisé dans une gamme de températures différentes. À des températures variant entre 400 et 1400 °C, la poudre de gibbsite est calcinée dans l'atmosphère environnante, c.-à-d. l'air naturel, dans l'ordre suivant [12]

- Chauffage à la température spécifiée à des différentes vitesses ;
- Maintien pendant des différentes durées à la température de calcination ;
- Refroidissement à la température ambiante (trempe à l'air).

Certains échantillons (de la gibbsite) ont été calcinés à des températures pour des temps plus long (24 h à 1000 °c) ou plus court (1 h à 400 – 600 - 800 °c) et ensuite analysés [13].



Fig (IV.3): Four de calcination 1000 °C [18]



Fig (IV.4): four de calcination 1400°C [11]

IV.3.2. Broyage

Le produit de réaction sera broyé avec un mortier avec un pilon, demain la mise en service du site de gibbsite.

Le but du processus de fissuration est de réduire les agrégats apparus ou formés pendant l'installation à différentes distributions granulométriques.

Pour le résultat de la distribution moyenne de la taille des particules environ 1 μm une morsure de temps de 200 tr/min a été broyée [10].

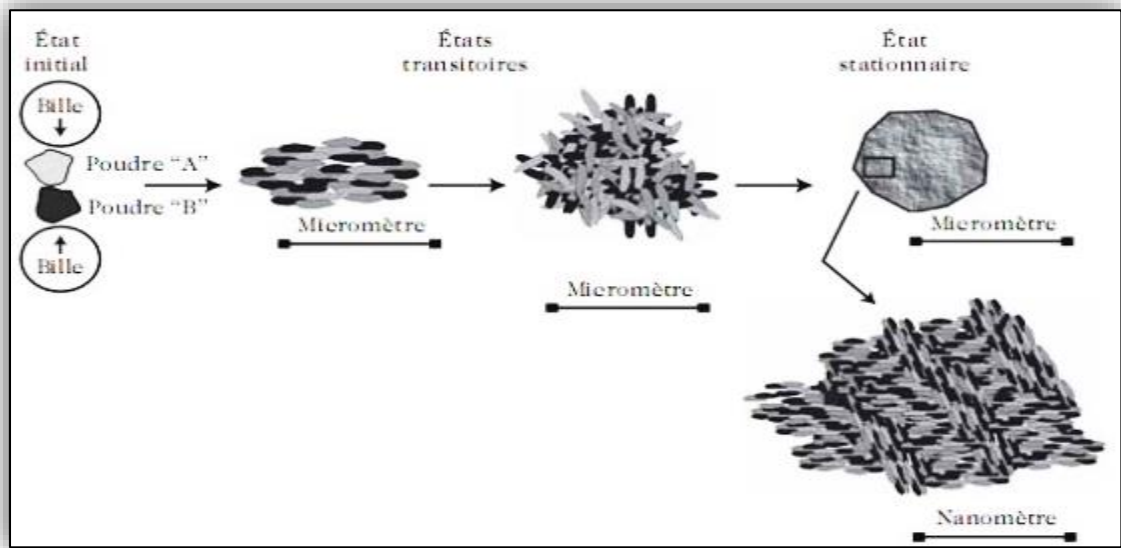


Fig (IV.5) : Schéma de principe du broyage à haute énergie [14]

➤ **Broyeur planétaire**

Le dispositif utilisé dans cette expérience est un dispositif de coupe de type Fritsch. Et ça marche de la façon suivante : il y a un pot à l'intérieur qui a des boules, attachées à une platine. Le pot s'enroule ensuite autour d'un axe vertical dans le sens inverse de la rotation du plateau. Il en résulte que les poudres sont exposées à des effets de frottement et de choc sous l'effet des forces centrifuges [26].



Fig (IV.6) : Broyeur planétaire [26].

IV.3.3. Compactage

Pendant la condensation au frittage à chaud par pression à froid pour réduire la porosité la poudre d'alumine dite est formée. Cette pression est sans doute le résultat d'une haute pression contrôlée de 8 à 10 tonnes.

Pour les pellets cette expérience est appliquée dans le laboratoire de l'Université de l'Abbesse Laghrour Khenchela., Les mesures prises pour cet amidon sont les suivantes[16]



Fig (IV.7): Etapes d'obtention des pastille. [15]

L'échantillon est fritté à 1000 °C. Pendant le cycle de frittage, la température de tolérance est mesurée à la surface du matériau, car elle est différente de la température de base du matériau parce qu'il n'y a pas assez de temps pour stabiliser la température.

Les conditions de frittage peuvent être organisées comme suit [16]:

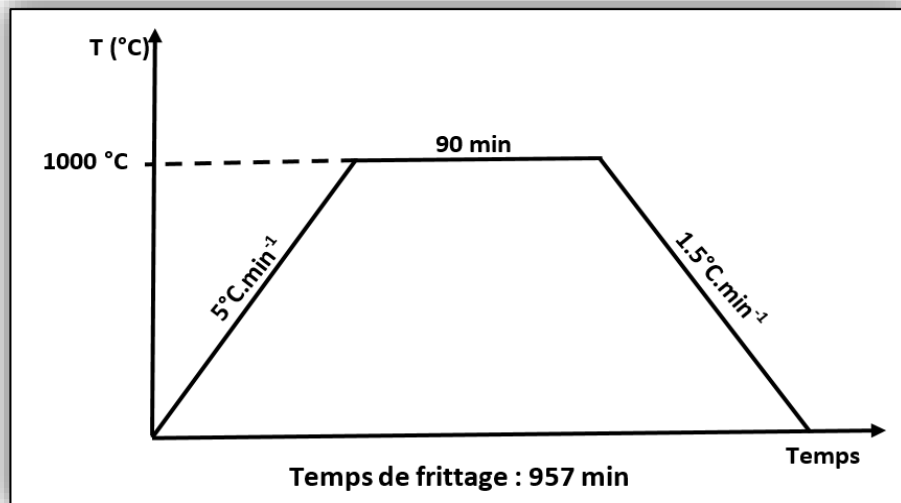


Figure (IV.8) : Cycle de frittage naturel de l'alumine. [22]

Les pastilles de synthèse d'alumine frittée ont été obtenues après le suivi d'une gamme de procédés, qui ont un diamètre de 13 mm d'épaisseur 2mm [26].

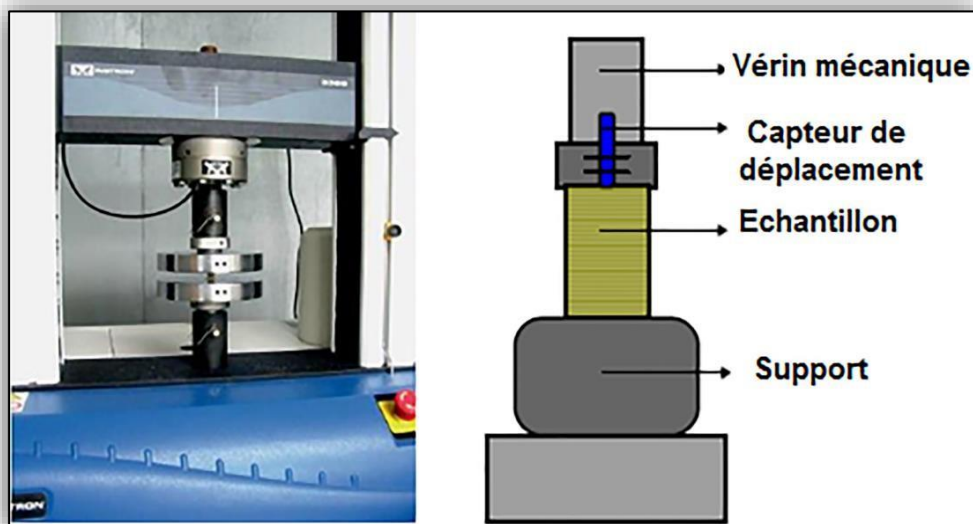


Fig (IV.9) : Schéma de l'essai de compression utilisé[18]

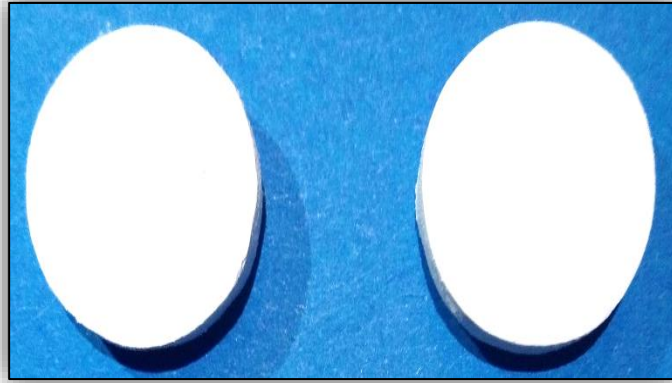


Figure (IV.10) : Pastille d'alumine frittée [16]

IV.4. Microscopie électronique à balayage (MEB)

La microscopie à balayage (MEB), a été mise à profit pour approfondir les observations métallographiques et permettre une appréciation plus complète des phases formées. L'identification des phases et de leur situation dans la structure, a été grandement facilitée. Une cartographie X a été également effectuée pour confirmer la disposition des différentes phases et plus particulièrement celle de $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-}\alpha$ dans la structure [12].

Le MEB fonctionne sous vide de l'ordre de 10^{-3} Pa, avec toutes sortes d'échantillons sans préparation particulière [30]. En ce qui concerne l'observation de la morphologie des échantillons réalisés, elle a été effectuée à l'université Mentouri de Constantine grâce au MEB microscope Joël JSM 5900 LV, avec source à effet de champ. Cette dernière autorise une densité de signal plus importante qu'un filament en tungstène et une meilleure résolution à fort grandissement [27].



Fig (IV.11): La Microscopie Electronique à Balayage(MEB) [13],

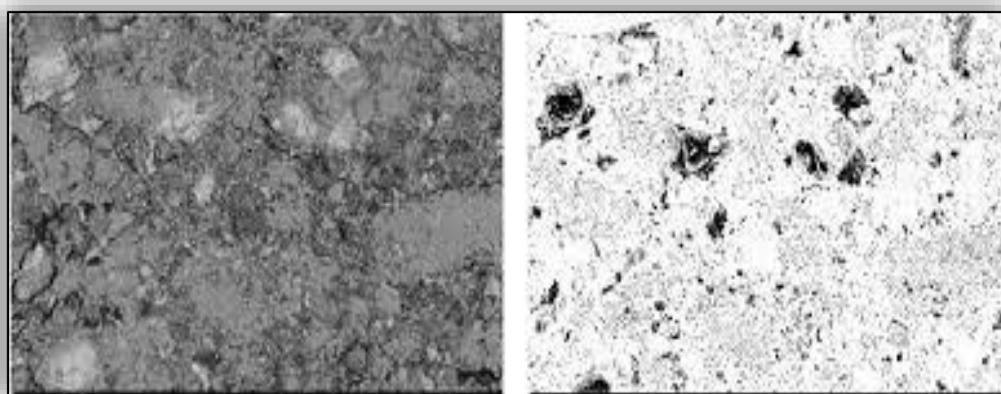


Fig (IV.12) : Micro graphies MEB de l'alumine- α [17]

IV.4.1. Analyse par diffraction des rayons X

La figure IV-9, montre la réalisation de l'analyse DRX d'une poudre de la gibbsite non traitée et non broyée. Donc en distingue une gibbsite trihydratée ($\text{Al}(\text{OH})_3$).

On a effectué un traitement thermique a des différentes températures intermédiaires de 600°C à 1000°C qui produisent différentes phases transitoires (Gamma, Delta et Thêta) (figure IV-10) [14].

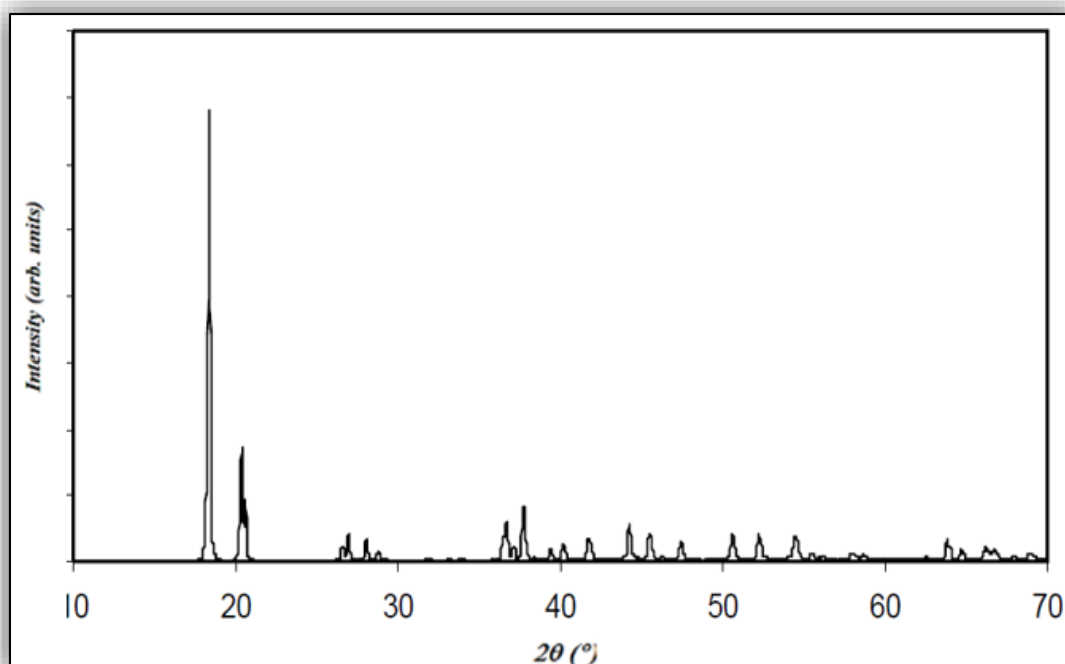


Fig (IV.13) : Spectre DRX de la gibbsite brute [30].



Fig (IV.14) : Diffractomètre Panalytical. [Laboratoire des sciences, Chaabt Erssass, université Frère Mentouri, Constantine. [23]

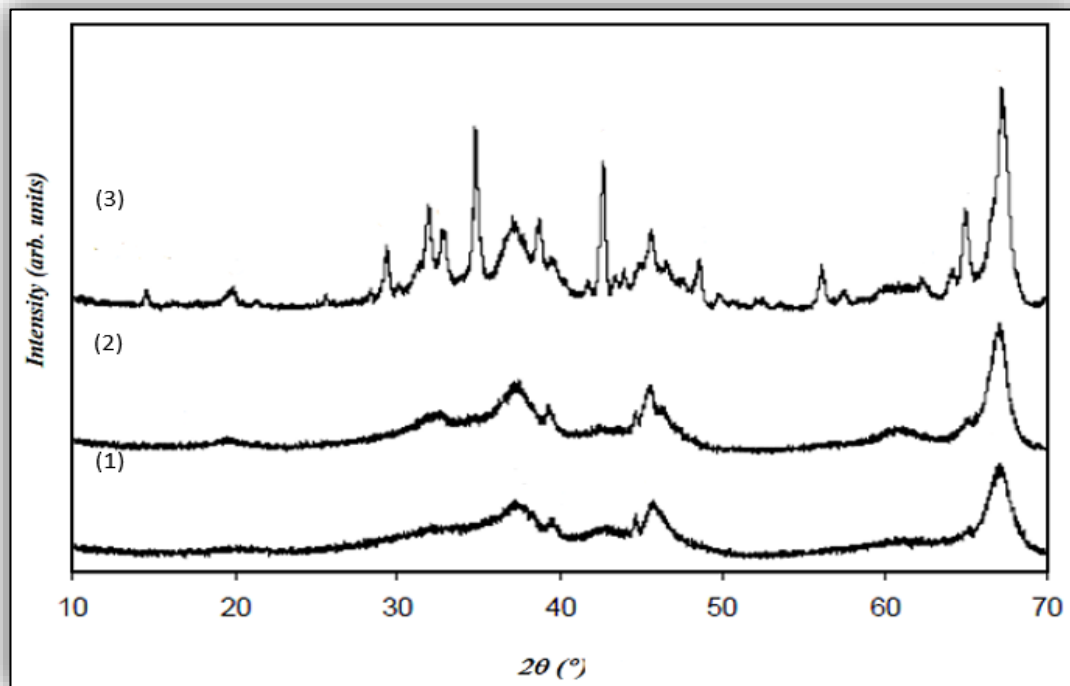


Fig (IV.15): Spectres de diffraction des rayons X de la gibbsite brute traitée à différentes températures pendant 24 heures (600-1000°C) : (1) Gibbsite calcinée (600°C) ; Alumine γ . (2) Gibbsite calcinée (800°C) ; Alumine K. (3) Gibbsite calcinée (1000°C) ; Alumine K+Alumine α [23].

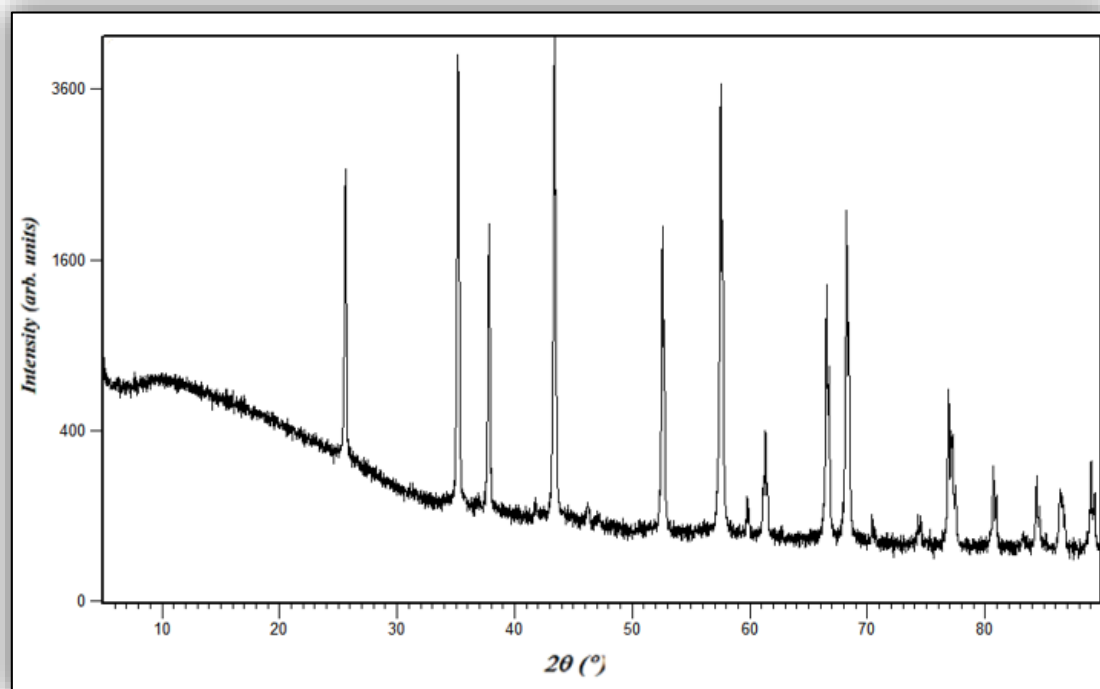


Fig (IV.16): Spectre DRX de la gibbsite brute traitée à 1400°C pendant 6 heures (Alumine α)[24].

Tableau (IV.1) : Position atomique de l'amine- α [27]

Atome	X	Y	Z
Al1	0	0	0.35200
O1	0	0.30600	1/4

La valeur des paramètres W et θ sont estimés par un fittage par Gaussien des Pics XRD. Cette formule n'est pas limitée par l'orientation préférentielle. La taille des cristallites de la Gibbsite sont estimées à (28.52) nm et ne varie pas avec les réflexions (hkl). Après la calcination à 600°C pendant 24 heures ; la Gibbsite est transformée en χ -Al₂O₃ L'estimation de la taille moyenne de la cristallite de cette phase est de (9.2) nm. À 1000°C durant 24 heures la Gibbsite est transformée en κ -Al₂O₃ ; l'estimation de la taille moyenne des cristallites de cette phase est de (24.33) nm. Les Pics de l'alumine alpha présente des variations significatives et donne la valeur de (40.73) nm à 1400°C [27].

➤ Discussion

L'alumine alpha qu'il a été calciné à 1400°C été rapporté sur la transformation Al₂O₃- κ → Al₂O₃- α que l'empilement des anions d'oxygène est conservé au cours de cette modification, mais la séquence d'empilement qui existait Al₂O₃- κ et qui est...ABAC...se transforme à la séquence ABAB.... Dans l'alumine- α [28].

La phase la plus stable de l'alumine (Le corindon) possède une structure rhomboédrique dans laquelle les ions oxygène forment un sous- réseau hexagonal compact dans lequel les ions d'aluminium occupent 2 / 3 des sites octaédriques interstitielles. Les paramètres de maille sont $A= 4.76020 \text{ \AA}$, $C= 12.99330 \text{ \AA}$ soit $A= 0,47602 \text{ nm}$, $C= 1,29933 \text{ nm}$. Lors du chauffage à des températures supérieures à 1100°C , la gibbsite se transforme en alumine alpha [26].

La micrographie MEB de la poudre de Gibbsite utilisée dans cette étude est montré dans la figure IV-9, la morphologie des particules montre la poudre chauffée à 1400°C ; les cristaux en forme de plaquettes sont coalescés et frittés, aspect lié à la haute température de calcination.

L'analyse par DRX de l'échantillon de 1400°C (figure IV-12) montre que l'alumine- α est seule présente, courbe en bon accord avec les fichiers de référence (46-1212 fichiers JCPDS). Dans cette structure, les unités tétraédriques AlO_4 sont inexistantes et seuls les cations Al_3+ subsistent (en sites octaédriques AlO_6) [28].

IV.4.2. Spectroscopie IR

Dans la gamme de température augmentant de 600 à 1400°C , la spectroscopie IR a permis de confirmer la séquence : Gibbsite $\rightarrow \text{Al}_2\text{O}_3\text{-}\chi \rightarrow \text{Al}_2\text{O}_3\text{-}\kappa \rightarrow \text{Al}_2\text{O}_3\text{-}\alpha$

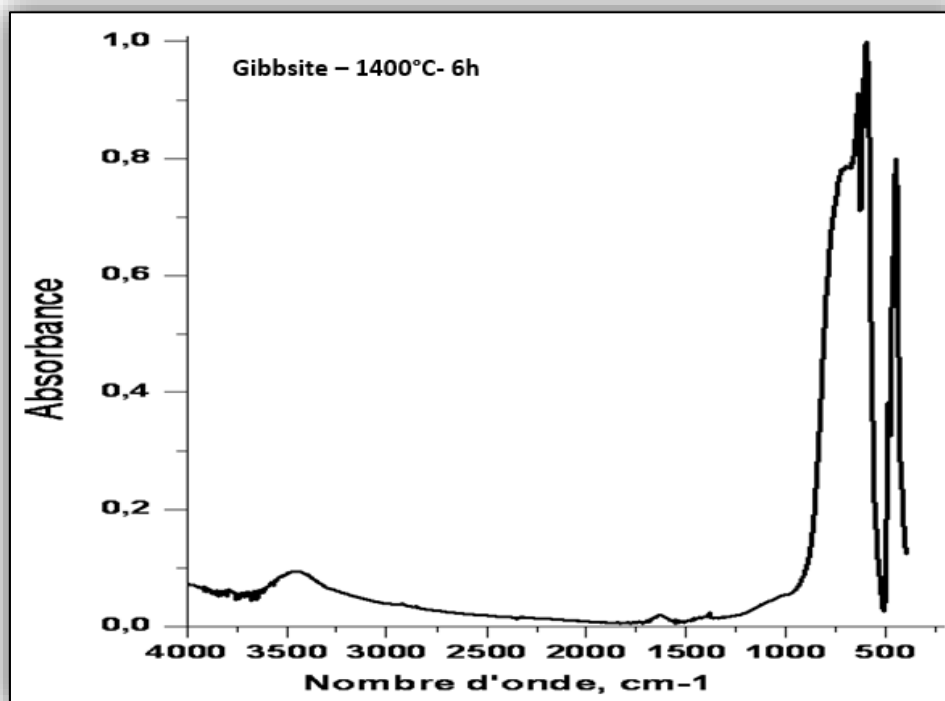


Fig (IV.17): Spectres FTIR de référence de l'alumine alpha [29].

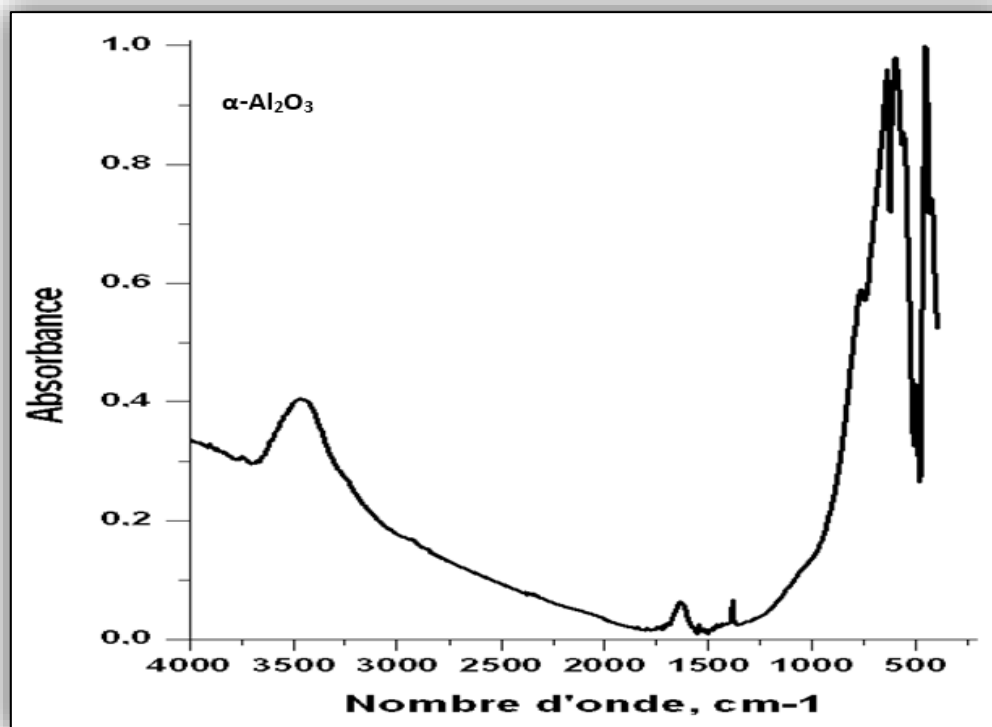


Fig (IV.18): Spectres FTIR de l'alumine alpha fritté à 1000°C[30].

Tableau (IV.2) : Les valeurs d'affectations de spectroscopie IR [27]

Valeurs	Affectations
452	δ (Bending Vibrations)
487	AlO ₆ unités (flexion O-Al-O)
598	ν (Stretching Vibrations)
639	AlO ₆ unités

➤ **Discussion** :(zone entre 200 et 800 cm⁻¹)

Finger-Print (empreinte digitale) ; zone caractéristique des vibrations d'élongations et de déformations des oxydes. Entre 400 et 650 cm⁻¹, Le pics d'énergie plus faible (moins de 500 cm⁻¹) sont affectées aux modes de flexion des unités AlO₆, les bandes au-dessus de 500 cm⁻¹ résultent de l'élongation des liaisons Al-O. Plus important encore, un continuum large et intense dans le domaine entre 650-800 cm⁻¹ est constaté ; région où aucune structure n'est à prévoir. Cette structure à haute énergie ressemble clairement le continuum d'énergies élevées déjà observé sur le spectre kappa. En analogie avec la suggestion faite pour ce dernier cas, nous proposons ces structures supplémentaires peuvent résulter soit des modes liés aux phases de

transitions (χ ou κ) et/ou les modes de surfaces, bien qu'aucune alumine de transition soit détectée par les analyses par rayons X [11].

IV.5. Définition tribologique

La tribologie tous les phénomènes liés au mouvement relatif des objets. Ils ont trois avantages, c.-à-d. la friction, qui est la résistance au déplacement mineur. L'usure due à la désintégration des surfaces dendritiques est le résultat d'une perte de matériau, et la lubrification dendritique est principalement le résultat de l'interférence des fluides entre les corps de contact. En 1968, G. SOLMON a proposé le mot science tribale, qui a été construit à partir des tribus grecques de Judor dans le sens de massage. Dans sa capacité, Aldi étudie tous les mouvements relatifs de deux objets en mouvement, de sorte qu'on peut dire que la tribologie est une branche de la mécanique qui se rapporte à l'engorgement, l'usure et la lubrification des surfaces de communication entre deux matériaux solides [30].

IV.5.1. Système tribologique

Un système tribologique est défini comme un système mécanique, composé de deux substances hostiles en contact, entraînées par des mouvements relatifs. Ces deux substances solides se développent au milieu d'un océan et peuvent être séparées par un film intermédiaire appelé un troisième objet. Au niveau tribologique, le troisième objet est un facteur qui transporte la charge (ou la portance) du premier objet à l'autre et est absorbé par le flux (flux) d'une manière de refroidissement (frottement) nécessaire pour faire varier la vitesse entre deux objets. Les tiers corps sont partiellement ou complètement séparés des premiers corps. Ils sont introduits en contact soit par glissement cinétique (lubrifiants solides ou liquides) en contact chargé, soit par formation in situ (molécules séparées) en contact dit sec.

Les interfaces d'un tel système deviennent le centre des phénomènes de dispersion d'énergie, regroupés sous le terme général friction. La quantification de ces énergies est d'une grande importance car elles adaptent le chauffage dans l'interface, ajustant la géométrie exacte et totale du contact (détérioration due à l'érosion entraînant la dégradation du système) [12].

IV.6. Les frottements

Nous pouvons dire que presque tous les aspects de notre vie sont affectés par les frictions avec les virus, comme avec les méthodes positives ou négatives. Nous estimons qu'il a un effet positif. Nous ne comprenons pas l'importance de l'exercice dans la vie de tous les jours. C'est le cas pour des choses comme démarrer, s'arrêter, tourner la voiture, réparer les pièces, tenir le corps dans la main... ... Etc [21].

L'usure qui en résulte sur les surfaces de perroquet, le plus souvent en fonctionnement, se traduit par une augmentation de la température, des changements géométriques et des

dimensions, des transformations physico-chimiques ou l'enlèvement de la matière. Les frictions et l'usure auxquelles elles donnent lieu sont des phénomènes complexes qui, de par leur étude, excluent des approches multiples [17].

Nous avons toujours voulu réduire, voire éliminer, l'usure afin d'augmenter le temps de fonctionnement et la fiabilité des machines.

a. Définition

La définition de ce que l'on entend par frottement mérite d'être donnée en raison de la complexité de la nature de la friction et du caractère interdisciplinaire de ce domaine de recherche, qui nécessite l'expertise et les connaissances de chimistes, d'ingénieurs, de métallurgistes et de physiciens [13].

- Le frottement peut être défini comme la force de résistance se chevauchant à l'interface partagée entre deux corps lorsque l'un se déplace ou a tendance à se déplacer par rapport à la surface de l'autre, par une force extérieure.
- Le frottement est aussi défini comme la résistance ou le mouvement qui se produit lorsqu'un corps solide est transporté à proximité de la surface d'un autre corps le touchant, ou lorsqu'on tente de provoquer un autre mouvement.
- Les critères ne déterminent pas la friction, mais la force de friction, c'est-à-dire la force qui résiste à l'association de deux corps quand l'un bouge ou a tendance à se déplacer par rapport à l'autre. Pour d'autres critères, le frottement dans les actions contre la relativité du corps est résumé dans la communication [8].

b. Types de frottement

Il existe trois types de frottement [14]:

➤ Frottement sec

Les frictions sèches se réfèrent à tous les phénomènes qui apparaissent dans la zone de communication entre deux corps, en l'absence de graissage, qui s'opposent à la glissade de ces corps. S'il y a un écart relatif entre les deux corps en contact, on parle de friction dynamique, sinon on dit que la friction est constante. La compréhension des mécanismes à risque est depuis longtemps très faible, malgré l'intérêt manifesté pour ce problème depuis de nombreuses années. Ce n'est que ces dernières décennies que des progrès importants ont été accomplis grâce à l'accumulation de données empiriques et de résultats théoriques [16],

Cependant, des progrès significatifs ont été accomplis grâce aux travaux de Hulm en 1938, indiquant que la rugosité du contact est plastifiée et supportable, et donc que le pouvoir de friction est directement lié aux pressions de cisaillement sur les intersections du problème.

Le modèle de Bodden et de Tabur suppose que les frictions sèches entre deux surfaces de bois sont principalement dues à deux processus physiques fondamentaux : les intersections de contact de précision formées aux points de contact et l'implantation des surfaces par la rugosité. Ainsi, la force de frottement sec est la somme de la force de cisaillement due à l'adhérence et de la force de déformation due au labour [23].

➤ **Frottement hydro dynamique**

Les surfaces du mouvement relatif ne sont pas connectées par une grotte parce qu'elles sont séparées par une épaisse couche de graissage. Le facteur de frottement est faible et ce type de frottement est mentionné pour une utilisation à grande vitesse ou lorsque la force normale est élevée [18].

➤ **Frottement onctueux**

Il s'agit d'un compromis entre les frictions sèches et les frictions hydrodynamiques : La membrane du liquide absorbé sur la surface, ou formé par réaction chimique, possède une épaisseur minime. Le degré de corrélation de ce film avec la surface détermine son efficacité. Cette vitesse offre un facteur de friction inférieur à la vitesse sèche [19].

IV.7. Le phénomène d'usure

La dégradation de la matière produit des déchets. L'usure dit est le résultat de la friction et se produit dans la zone de communication. Les paramètres qui influent sur le taux d'usure sont les suivants [11]

- Personne à contacter.
- Conditions de fonctionnement : la charge, la température, la vitesse et la pression ; Zone d'appel.
- L'état physico-chimique des surfaces de friction (rugosité, couches d'oxydation).
- Les propriétés mécaniques des substances (rigidité).
- Absence ou présence de lubrifiant.

a. Définition de l'usure

L'usure est un processus complexe, qui correspond aux dommages causés par les surfaces en contact. Elle peut être une dégradation physique, une attaque chimique dépendant de l'environnement dans lequel la substance se trouve et dépendant également de ses propriétés. Il peut être généré par plusieurs mécanismes physiques, chimiques ou mécaniques indépendants ou non. Il existe quatre formes différentes d'uniformes normalement fournis [25].

b. Les Causes de l'usure

Les principaux facteurs d'usure sont

- La nature des matériaux en contact
- Les conditions de fonctionnement (pression, température, lubrification, ambiance corrosive, etc.) [26]

c. Effets de l'usure

Le frottement est la cause principale de l'usure qui entraîne les effets suivant

- Altération dimensionnelle des pièces.
- Augmentation des jeux de fonctionnement.
- Dégradation des caractéristiques superficielles [27].

IV.7.1. Les mécanismes d'usure

a) L'usure par abrasion

Au début, il pensait que l'usure de la perruque, après avoir été séparé d'une ou deux surfaces dures ou rugueuses, ressemble au procédé de découpage sur les outils de la machine. Cependant, des microscopes ont montré que cette rugosité peut dégrader une surface solide selon les différents mécanismes décrits dans la figure II.2. L'intensité de la communication dépend des caractéristiques et de l'architecture des matières en contact [28].

La nature de la corrosion est déterminée par la méthode d'orientation de la rugosité dans le contact : Soit la rugosité est installée sur une surface, puis nous parlons de l'érosion, ou bien la rugosité est en mouvement sur les deux surfaces, et puis nous parlons de l'érosion du corps triple [29].

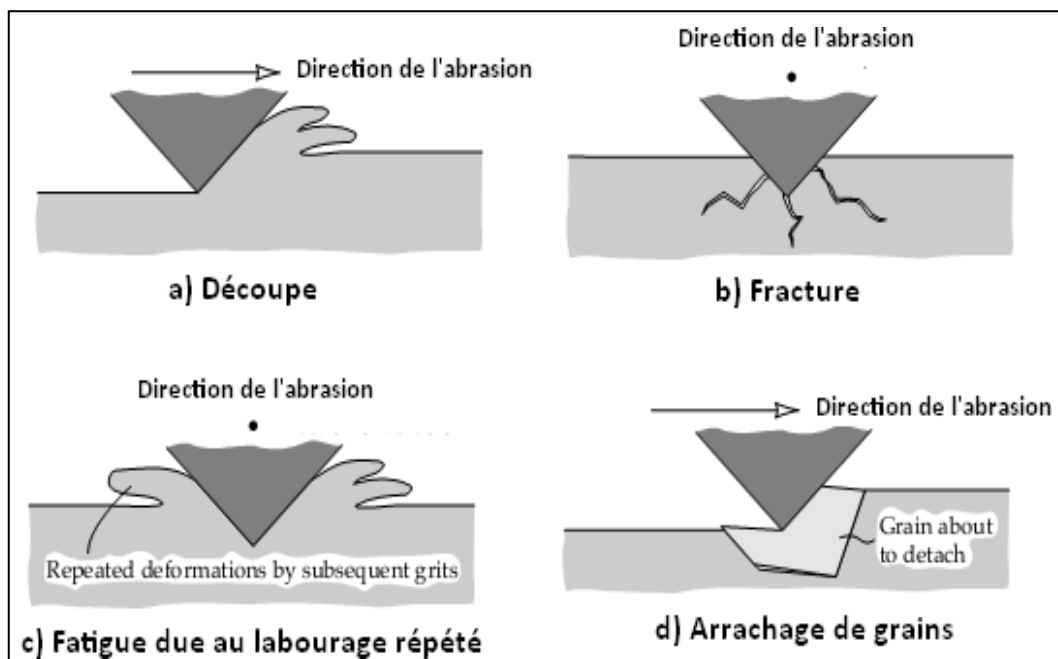


Fig (IV.19): Schéma des quatre modes d'usure abrasive [12].

b) L'usure par adhésion ou grippage

Cette formation se caractérise par un sous-ensemble (bien-être partiel) lors des communications entre les surfaces de frottement. En cas de panne, la partie tronquée se situe sur la face avant. Lorsqu'elle est forte, la rupture se produit à l'intérieur des matériaux les plus malléables qui sont transportés vers les matériaux les plus difficiles [12]

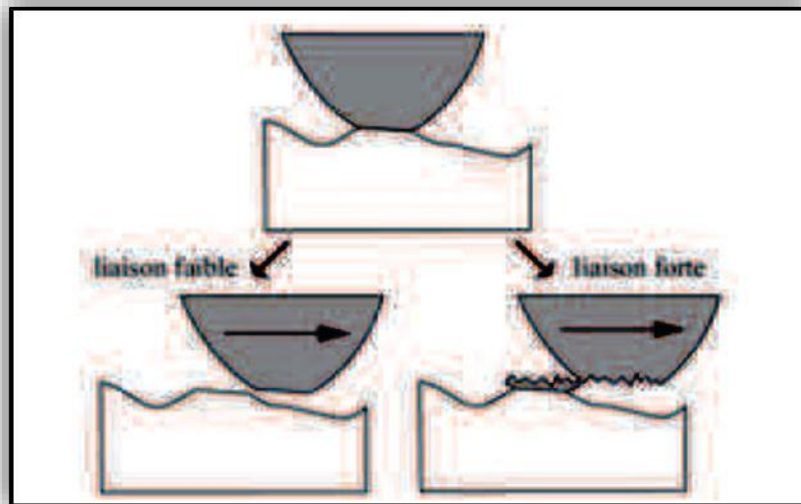


Fig (IV.20): Cisaillement des jonctions à l'interface et caractéristique de l'usure adhésive [12]

c) L'usure par fatigue

Il est lié au fonctionnement du mouvement circulaire et à la capacité des matériaux d'absorber les énergies de déformation et les pressions thermiques de friction. La fatigue se manifeste dans les fentes, les échelles et les modifications de la structure minérale [12].

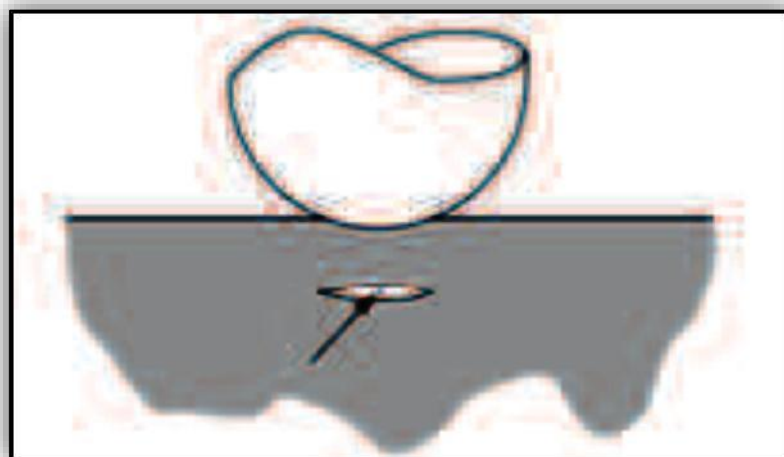


Fig (IV.21): traction de l'usure par fatigue [12].

d) L'usure par réactions tribo chimiques

Il s'agit d'un système à trois composantes, où l'interaction chimique entre les surfaces, la réaction chimique avec l'environnement (huiles lubrifiantes, etc.) et l'interaction physique et chimique avec les débris. Dans de nombreux cas de réactions chimiques tribales, un film protecteur (tribo film) est produit sur les surfaces de la mâchoire. Par exemple, des additifs anti-portants tels que le ZDDP. La membrane protectrice de phosphate sur les surfaces est formée par réaction Substances chimiques entre l'oxyde de fer d'origine et les éléments de dégradation dans l'additif [13].

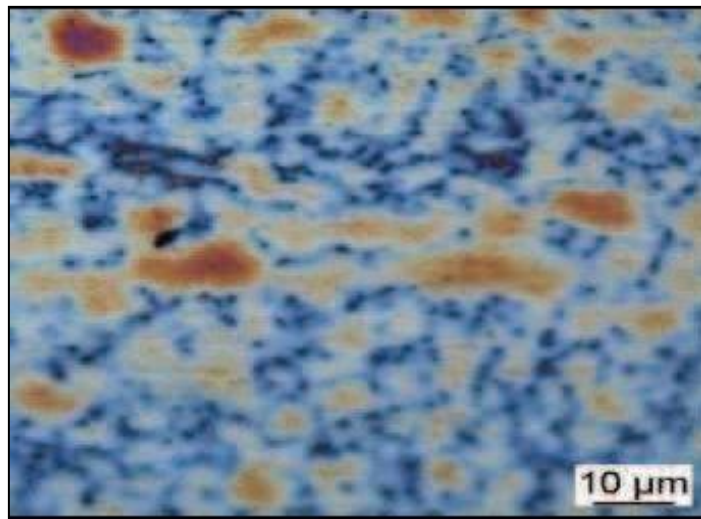


Fig (IV.22): Image optique d'un tribo film de ZDDP [26].

e) L'usure par corrosion

Certaines huiles contiennent des suppléments ou des métaux qui ont un caractère acide, et qui peuvent attaquer les surfaces de fragments par le phénomène de corrosion. Donc, la corrosion est une dégradation des parties par l'acide [28].

IV.8. Techniques expérimentales d'élaboration

IV.8.1. Types de matériaux nano structurés

Il existe de multiples et différents critères par lesquels nous pouvons classer les matériaux qui se rapportent à la nanostructure : cela se reflète dans la valeur dans la littérature que nous pouvons considérer la norme la plus précise et pertinente. Ainsi, nous avons représenté sur la figure III-1 une classification des nanomatériaux [25] :

- Les matériaux nano phasés ou nanocristallins tridimensionnels.
- Les couches simples et multiples modulées selon une ou deux dimensions ;
- Des amas d'atomes (quelques milliers) jusqu'à la nanoparticule (~10⁶ atomes) [11] ;

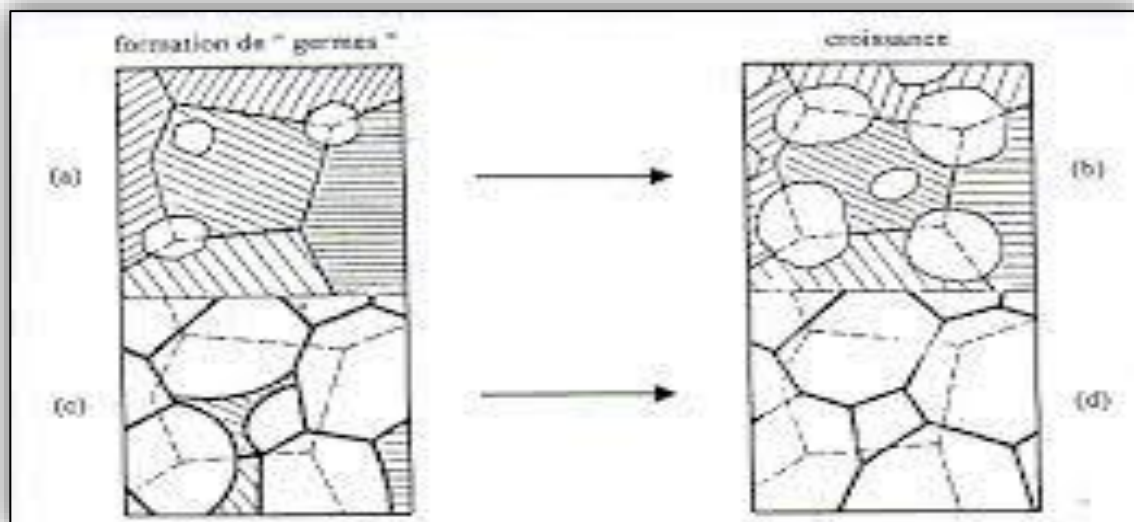


Fig (IV.23) : Représentation des quatre types de matériaux à nano structure [14].

- (a) nanoparticules ou amas d'atomes.
- (b) multicouches constituées de couche d'épaisseur nanométrique.
- (c) couches simples nano structurées.
- (d) matériaux nanocristallins ou nano structurées à 3D.

IV.8.2 Propriétés des nanomatériaux

Les nanostructures peuvent acquérir de nouveaux matériaux avec des propriétés mécaniques, physiques, optiques, électriques, magnétiques et catalyseurs spéciaux plusieurs propriétés originales, peuvent différer des propriétés du même matériau à une échelle différente [26].

➤ Principaux minerais

On peut dire que la bauxite est le principal minerai utilisé à ce jour pour l'alumine, car elle est composée d'alumine et peut être facilement extraite sous forme d'hydroxydes. Et c'est là qu'on trouve les découvertes de bauxite [13].

IV.9. Alumine- α

L'alumine ou oxyde d'aluminium, de formule chimique Al_2O_3 , est un composé chimique qui existe à l'état naturel dans la bauxite, sous forme d'alumine hydratée mélangée avec de l'oxyde de fer. L'alumine a été isolée en 1754 par le chimiste allemand Marggraf à partir d'alun. C'est Louis Guyton de Morveau (1737-1816), collaborateur de Lavoisier, qui baptisa Alumine l'un des sulfates contenu dans l'alun [26].



Fig (IV.24): Quelques photos de l'alumine alpha[15].

IV.9.1. Structure cristallographique

L'alumine α ou le corindon se forment dans le système facial particulier. Le rhomboèdre est généralement dessiné sous la forme d'un rapport enseignant hexagonal c/a basé essentiellement sur les paramètres l et α de la maille rhomboédrique [7].

Le groupe spatial de la phase α est $R3c$. La maille élémentaire, un rhomboèdre de paramètre $a=0,5126$ nm et $\beta=55^{\circ}17'$, est défini pour le motif Al_4O_6 . La représentation peut être simplifiée par rapport au réseau d'oxygène qui définit la structure hexagonale compacte et en suivant les cycles d'oxygène périodiques ABAB dans une telle structure [14].

Réserves d'aluminium $2/3$ du total des huit sites Surfaces [8]. Le tiers restant est réservé aux emplacements vacants, ce qui entraîne une légère distorsion du réseau à six voies [8].

Trois types de couches de platelage peuvent être définis a , b , c . À travers le site du site de cation vacant dans la couche, et donc on peut dire qu'il existe entre deux couches de cycles d'aluminium, qui est qu'il s'agit d'une couche d'oxygène de sorte qu'il nécessite sept couches de cycles d'oxygène pour représenter le réseau structurel selon la séquence $AaBbAcBaAbBcA$ [7].

La densité théorique d'une mole d'alumine peut être calculée à partir des paramètres de maille : elle a été évaluée à $3,9852$ g/cm³ par PHILIPS et al. En 1980 [9], avec $a=0,475923$ et $c=1,299208$ nm.

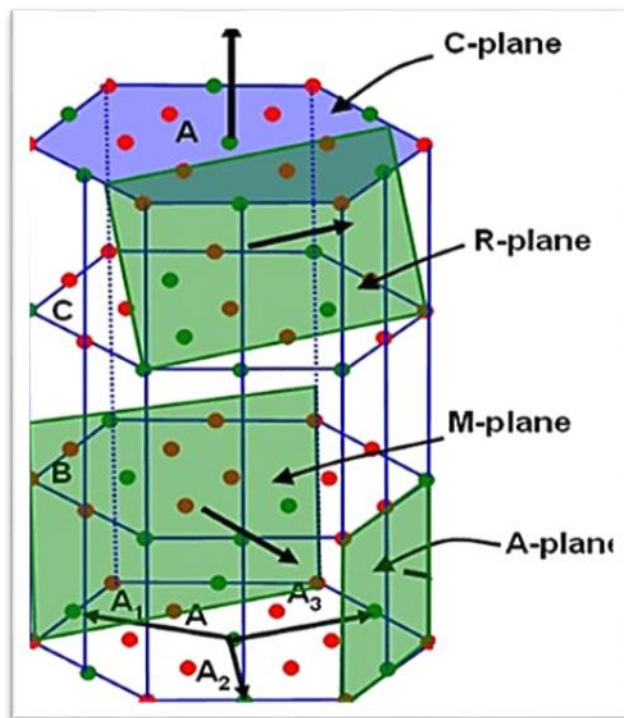


Fig (IV.25): Représentation de la maille primitive rhomboédrique de l'alumine- α (vecteurs de base a_i) et de la maille hexagonale (vecteurs de base A_i) [11].

IV.9.2. Calcination des aluminés hydratés

Après le calcul à haute température (1000-1200 ° C). Qui est l'étape α . Ils sont les plus stables dans des conditions normales tous les types d'alumine hydratée sont convertis en alumine α [19] .

Les monohydrates et les tri-hydrates forment premièrement des phases transitoires métastables avant de se transformer en phase α . La gibbsite forme successivement des aluminés de transition de type χ ($\geq 300^\circ\text{C}$) et κ ($\geq 800^\circ\text{C}$) alors que la boehmite transite par les phases γ ($\geq 500^\circ\text{C}$), δ ($\geq 850^\circ\text{C}$), θ ($\geq 1050^\circ\text{C}$) avant de se transformer en alumine α vers 1150°C . Par contre, la bayérite transite par les phases η (300°C) et θ ($\geq 850^\circ\text{C}$). Le diaspore ($\beta\text{-Al}_2\text{O}_3\cdot\text{H}_2\text{O}$) est le seul hydrate qui conduit directement à l'alumine α vers 500°C [15].

Lorsque l'alumine de transition apparaît, on peut dire qu'elle est extraordinaire à l'énergie de surface associée aux phases. La puissance de surface de l'aluminium - α a plus de valeur que $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$. La stabilité de la phase $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$. Il est le résultat d'une augmentation de la superficie spécifiée au-dessus de $175 \text{ m}^2/\text{g}$ d'alumine. Le matériau « abaisse » son énergie en adoptant une forme métastable convenable [18]. Généralement, les phases de transition coexistent avec les phases de précurseurs.

Une calcination La température élevée conduit à la croissance inhabituelle des granules ou α phase. Après le frittage, il en résulte une faible densité, qui a un effet sur les propriétés mécaniques du produit. Pour le traiter doit abaisser la température de composition α alumine, le traitement des poudres hydrate déshydratant peut-être traité [10]. Le prétraitement du site la gibbsite ($\text{Al}(\text{OH})_3$) réduit la température de conversion de 250°C par broyage. Il facilite l'énergie accumulée lors de la fragmentation du grain et déforme le noyau de la phase α . dans des hydrates précurseurs qui facilitent la conversion de l'alumine conventionnelle. Le nettoyage de la poudre α et le broyage ensemble réduisent la température de déplacement du mélange de 50 % de gibbsite et d'alumine α [12].

La gibbsite en poudre a des granules grossiers, la vitesse de décharge de son eau est moindre, parce que le massage peut former la boehmite. L'alumine se traduit par une transformation microstructurale transitoire en phase α cristallisée dans un processus en deux étapes. L'étape de mention est suivie d'un ballon de zoom. Qui doit fournir la phase stable α haute énergie d'activation, nécessitant une haute température [10].



Fig (IV.26): Calcination des aluminés hydratées [14]

IV.9.3. Broyage des poudres

Le broyage mécanique à haute énergie également appelé mécano synthèse a été développé dans les années 60, par John Benjamin [11] pour réaliser des dispersions d'oxydes (Al_2O_3 , Y_2O_3) dans des alliages de nickel dans le but de renforcer leurs propriétés mécaniques

A partir des années 80, cette technique fut utilisée des solutions solides sursaturées constituées d'éléments immiscibles et des matériaux nano structurées [27].

La technique de mécano synthèse a un potentiel d'application assez vaste. Elle permet d'obtenir des structures uniques avec des coûts d'élaboration peu élevés. C'est pourquoi elle a connu un véritable essor dans les années 1980 et 1990. Deux terminologies sont employées pour définir le broyage à haute énergie : on parle de mécano synthèse, quand les poudres

initiales ont une composition différente de celle(s) d'arrivée, et de "broyage mécanique", dans le cas contraire [7].



Fig (IV.27) : Broyage des poudres[30]

Le broyage à haute énergie est fait de vibrations un peu violentes, de poudre et de balles trouvées dans une grange étanche. Sous l'effet d'un ensemble de collisions, la déformation des comprimés de poudre se fait de manière rotative et plastique, et en même temps en les cassant et en les collant ensemble, résultant en un mélange de différents ingrédients. C'est le rapport de fracture et d'interconnexion qui étend la taille finale des groupes de poudre. Tous ces phénomènes sont à la base de l'obtention d'une structure cristalline secondaire. Les poches de points sont à la fois des espaces, des déséquilibres et ainsi de suite par broyage de poudre et sont des distorsions plastiques graves, ainsi que des bandes de cisaillement consistant en réseaux de perturbations. Les désordres sont réorganisés en murs par extermination et recombinaison pour la formation de sous-articulations, et donc sous-grains [28].

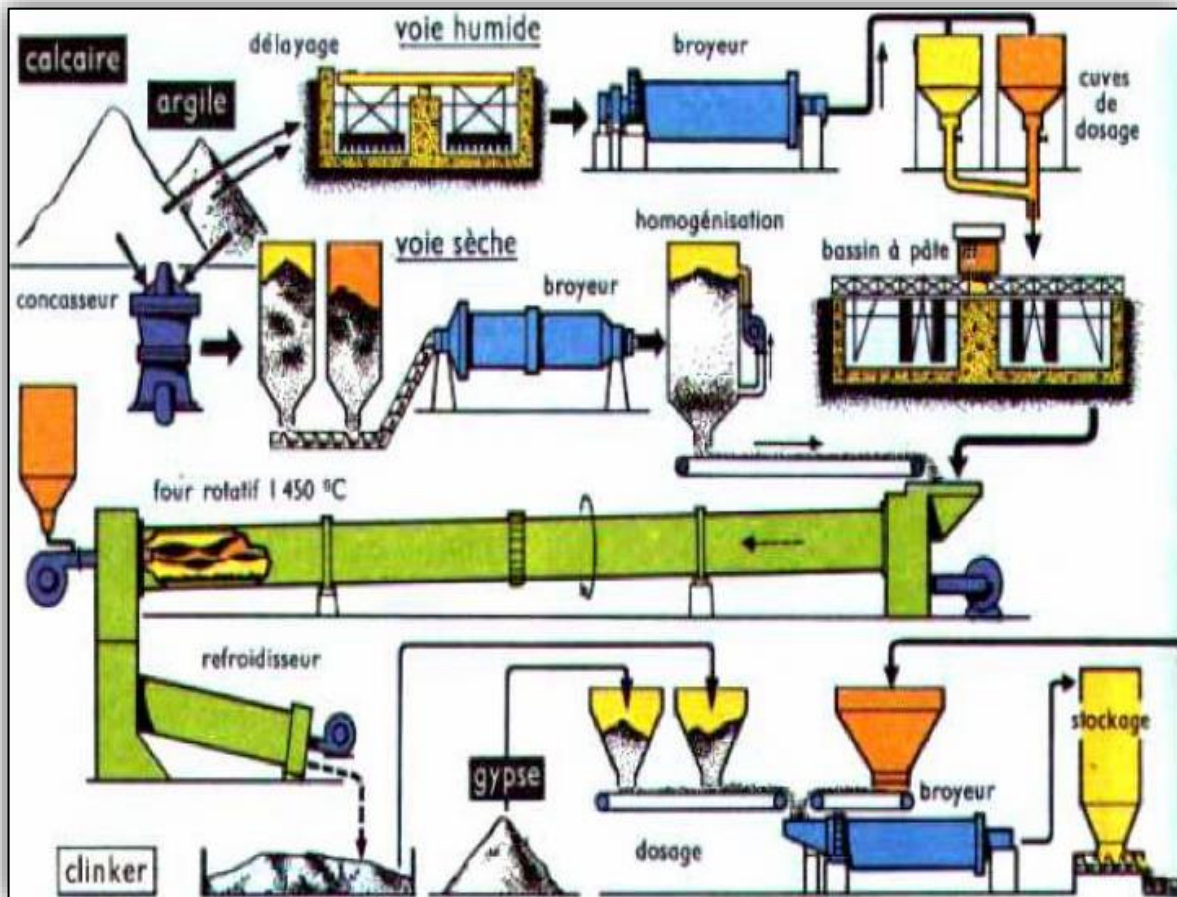


Fig (IV.28): Schéma de principe du broyage à haute énergie[29].

Tableau (IV.3) : Techniques de broyage couramment employées [10].

Technique	Mécanisme de broyage
Tourne-jarres	Impact
Broyeur à marteaux	Impact
Broyeur planétaire	Impact
Attrition	Frottement, cisaillement

IV.9.4. Les différents types des broyeurs

a) **Attriteur** : Les billes sont mises en mouvement par la rotation de l'arbre central sur lequel sont fixés des bras secondaires. Le cylindre est fixé [28].

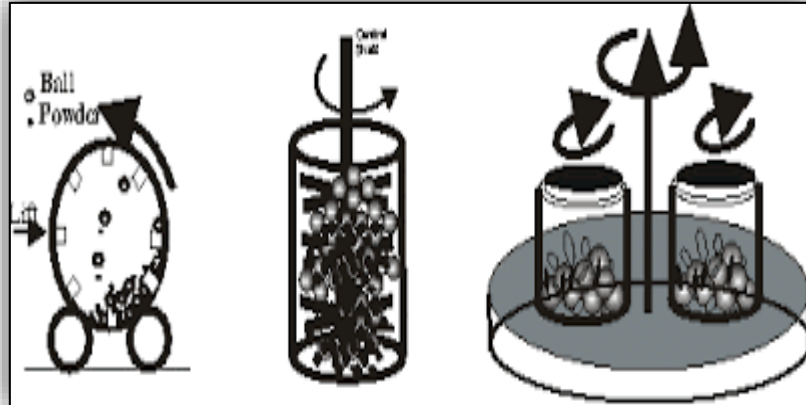


Fig (IV.29): Le broyeur type Attriteur [29].

b) **Broyeur horizontal** : Le cylindre est en rotation par rapport à son axe de symétrie horizontal par combinaison de la force centrifuge induite par cette rotation et de la gravité, les billes s'élèvent puis retombent sur les particules de poudre [13].



Fig (IV.30): Broyeur type horizontal [14].

c) **Broyeur vibratoire 1D** : l'enceinte est mise en mouvement oscillant vertical. Sous cette action la bille (1 kg de masse) s'élève puis retombe sur les particules de poudre [14].



Fig (IV.31): Broyeur type vibratoire 1D [26].

d) Broyeur planétaire : Le plateau sur lequel sont fixés les conteneurs est mis en rotation pour parvenir à une accélération centrifuge pouvant atteindre les 30 à 50 kg. Les conteneurs eux-mêmes sont mis en rotation de façon couplée ou découplée sur les broyeurs planétaires modernes [26].



Fig (IV.32): Broyeur type planétaire [12].

e) **Broyeur vibratoire 3D** : Le principe reprend celui du broyeur vibratoire à 1D. mais cette fois-ci plus complexe puisqu'à 3 dimensions [12].

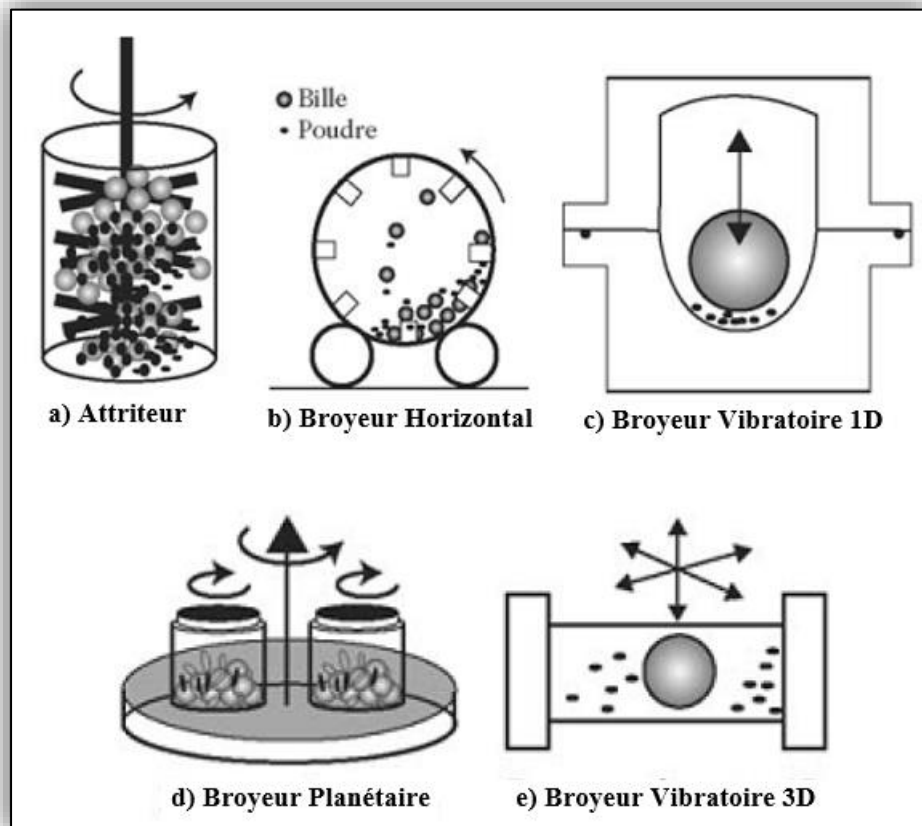


Fig (IV.33): Broyeur vibratoire 3D [29].

IV.9.5. Conditions expérimentales du broyage

- Nature des poudres ;
- Le broyeur ;
- L'intensité de broyage ;
- Temps de broyage ;
- Rapport massique billes/poudre RBP ;
- Atmosphère de broyage ;
- Température de broyage [29].

a) Mécanisme de broyage d'alliages et de composés

Dans le processus de broyage à haute énergie, les particules de poudre sont aplaties, soudées, brisées et soudées, respectivement. A chaque étape de la collision, environ 1000 particules sont enregistrées entre les boules. La déformation des particules résultant de la force d'impact conduit à la dégradation de la surface nouvellement créée est capable de recharger. De

ce processus peut croître la taille des particules utilisées matériaux malléables, ductiles, souples, cassants et fragiles [26].



Fig (IV.34): Broyage d'alliages et de composés [26].

b) **Composé intermétallique désordonné**

Le broyage haute énergie introduit une forte énergie libre dans le matériau pendant le processus. Cette énergie peut être stockée sous forme de désordre anti-site ou de joint de grain telle que $\Delta G (\text{broyage}) = \Delta G (\text{désordre}) + \Delta G (\text{joint de grain}) \dots\dots\dots (1)$ [13]

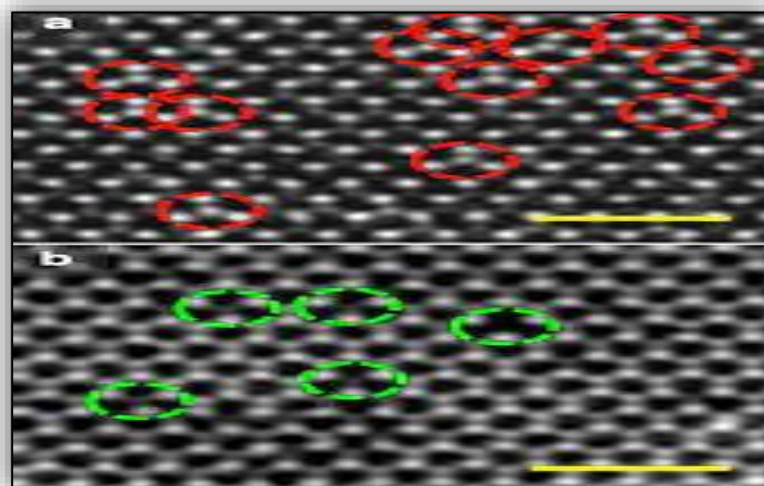


Fig (IV.35): Représentation à 2D d'un défaut triple désordonné[26].

- a- Structure ordonnée
- b- Défaut triple désordonnée

c) **Mécanisme d'amorphisation** : En raison du taux élevé de déformation du plastique les particules de poudre fusionnent résultant en la température locale des poudres. Et ici on peut dire que la température et la décomposition des particules est plus grande que la température pendant le broyage. Pour expliquer ce processus, les scientifiques ont noté qu'il existe une réaction à l'état solide similaire dans les membranes minces et ne pas se former pendant le broyage n'est pas un processus purement mécanique [8].

Au cours du processus de broyage, l'accumulation de défauts structurels résulte de perturbations, de joints de grain et d'interstices conduisant à la rupture de la phase cristalline. La diminution progressive du volume de grain et, par conséquent, l'expansion du coefficient de grille peuvent augmenter l'énergie libre du système et augmenter la surface inter faciale [18].

IV.9.6. Mise en forme

La pression de poudre peut être faite en condition égale ou matrice fermée. D'autres méthodes sont la formation d'injection et le laminage [12].

a) La compression en matrice fermée

En appuyant sur la forme d'une pièce fabriquée à partir d'une matrice fermée peut être déterminée par les outils c.-à-d. poinçons ou des parois de la matrice ainsi que la condensation peut être obtenue en divisant la force axiale, entraînant une pression radiale, assurer la pression des poudres sur les parois ancrées des instruments.

Le processus d'analyse comporte plusieurs étapes : remplissage et fermeture de l'outil, utilisation de la force, La répartition du stress à l'intérieur de la tablette est l'un des plus grands problèmes de pression axiale.

Les pressions de s'éloigner du poinçon qui applique la charge deviennent plus grandes que la pression, en raison du frottement entre les parois des matrices et la poudre [16].

Finalement l'éjection du comprimé par déplacement du piston inférieur est une étape délicate à cause du relâchement localisé des contraintes et du frottement avec les parois de la matrice. Ces efforts peuvent causer la fissuration du comprimé [10].

b) La compression isostatique

Comme auparavant, la distribution inégale de la densité et la variation des propriétés du disque sont parmi les principaux inconvénients de l'annexion de la matrice fermée. Une pression égale aide à surmonter ces défauts.

Il en résulte une densité verte et une résistance plus élevée homogène à celles obtenues par compression de la matrice. Par exemple la résistance à vert pour une poudre d'acier pressée de façon isostatique peut être 50% plus élevée que celle obtenue en matrice à la même pression.

Dans cette méthode, la poudre est introduite à l'intérieur d'un moule élastique (généralement du polyuréthane). Ensuite le moule avec la poudre est placé dans une enceinte haute pression en acier et la pression est appliquée par l'intermédiaire d'un liquide, souvent de l'huile.

Cette technique est souvent employée pour la fabrication de grandes pièces cylindriques. Ses désavantages sont les faibles cadences de production, la précision dimensionnelle et l'état de surface médiocres [13].

IV.10. Frittage

Le frittage correspond à la consolidation thermique d'un matériau pulvérulent sans fusion d'au moins l'un de ses constituants. C'est l'une des opérations les plus délicates et souvent la plus coûteuse lors de la préparation des céramiques. Au cours du cycle thermique, la microstructure se met en place, par transport de matière entre grains, afin de minimiser les excès d'énergies d'interface, ce qui s'accompagne généralement d'une diminution de la porosité. Cette dernière se manifeste de façon macroscopique par un retrait par rapport à la pièce « crue » [26].



Fig (IV.36): Opération de frittage [18].

a) **Frittage en phase solide** : Tous les ingrédients restent solides pendant ce type de frittage, et le joint résulte du soudage et du changement de forme du grain. Lorsque le procédé de frittage en phase solide se produit une transformation thermique, en trois phases selon la courbe thermique égale pour le développement de la densité relative en fonction du temps [18] :

-
- La formation des ponts, entre les grains, qui se termine vers une densité relative de 0,65;
 - L'élimination de la porosité ouverte qui se déroule entre des valeurs de densité relatives de 0,65 et 0,92 ;
 - L'élimination de la porosité fermée jusqu'à la fin du frittage, cette dernière étape est la plus difficile plusieurs mécanismes de transport de la matière vers le pont peuvent intervenir lors de la première étape du frittage, on distingue [13] ;
 - Les transports gazeux par évaporation-condensation ou par diffusion gazeuse qui conduisent la matière de la surface des grains vers le pont ;
 - La diffusion superficielle de la matière issue de la surface des grains ;
 - La diffusion en volume de la matière issue de la surface des grains ;
 - La diffusion en volume de la matière issue des joints de grains ;
 - La diffusion aux joints de grains de la matière issue des joints de grains ;
 - La déformation plastique dans le volume. Les transferts de gaz et de surface conduisent à une intégration simple de la pièce tout en étalant dans les joints de grain et en taille ainsi qu'à intensifier la pièce, dans tous les cas [12].

b) Frittage avec phase liquide

Plusieurs études ont été menées sur les principes du frittage liquide, au début du XXe siècle. En raison de la complexité des systèmes étudiés, il y a encore des zones grises. En ce qui concerne les mélanges de matières premières argileuses, voici la phase de pré-frittage jusqu'à 950 ° C. Et de manière individuelle, chaque métal argileux se développe, avec seulement des interactions dépassant la température. L'ajustement de la température de la présence alcaline ou alcaline de la Terre dans les formulations primaires peut avoir un revenu et une phase liquide dans la céramique pendant le frittage. Les phénomènes de condensation s'intensifieront même en très petites quantités [25].

Souvent il est difficile de mettre en évidence la présence de liquide plusieurs fois en raison de la complexité des interactions entre les étapes dans la céramique, on peut dire qu'il est dans un état concurrentiel. La compréhension des phénomènes impliqués dans le frittage des liquides exige un bon contrôle du temps d'endurance, de l'effet du cycle thermique et de la taille des particules de poudre sur les microstructures et les propriétés du produit fini [9].



Fig (IV.37): Frittage avec phase liquide [9].



Fig (IV.38):Le four utilisé dans le frittage[11].

IV.11. Techniques de caractérisation**IV.11.1 Analyse spectrométrie (Infrarouge)**

Un spectromètre infrarouge est chargé d'identifier les composés inorganiques et organiques. Tout type est cristallin ou amorphe. Parce qu'il ne capte que les mouvements de vibrations par exemple pour les cycles en relation les uns avec les autres. Avec l'avènement des spectromètres de conversion instantanée, on assiste à un regain d'intérêt. En prélevant des échantillons précis (~ 30 mg), en analysant des produits inorganiques avec une grande efficacité, en grande quantité, l'exigence d'être précisément broyé, l'utilisation de bromure de césium (CsBr de l'ordre de 100 mg) et l'échelle du spectromètre dans le lointain infrarouge peut atteindre 200cm^{-1} , et soutient bromure de potassium Ici, les produits inorganiques peuvent être identifiés si bien cristallisé, cristallisé ou mauvais, la gamme de signature des substances va des oxydes, carbonates, sulfates, etc. se situe entre ~ 1500 et 200cm^{-1} , cette partie du spectre FTIR est nommée Finger-Print[12].

L'interaction avec le matériau et l'échange d'énergie sont parmi les caractéristiques du rayonnement électromagnétique, résultant en l'émergence du spectre d'absorption. Dans les spectroscopies vibratoires, auxquelles appartiennent le NIR et le MIR, le résultat de l'énergie mécanique essentiellement associée aux vibrations atomiques dans les liaisons chimiques est le résultat de la réaction de transfert d'énergie radioactive, c'est-à-dire les vibrations d'expansion et de flexion [4].



Fig (IV.39): Photo d'une microscopie infra rouge. [Laboratoire de la chimie université Abbess Laghrour de Khenchela [12].

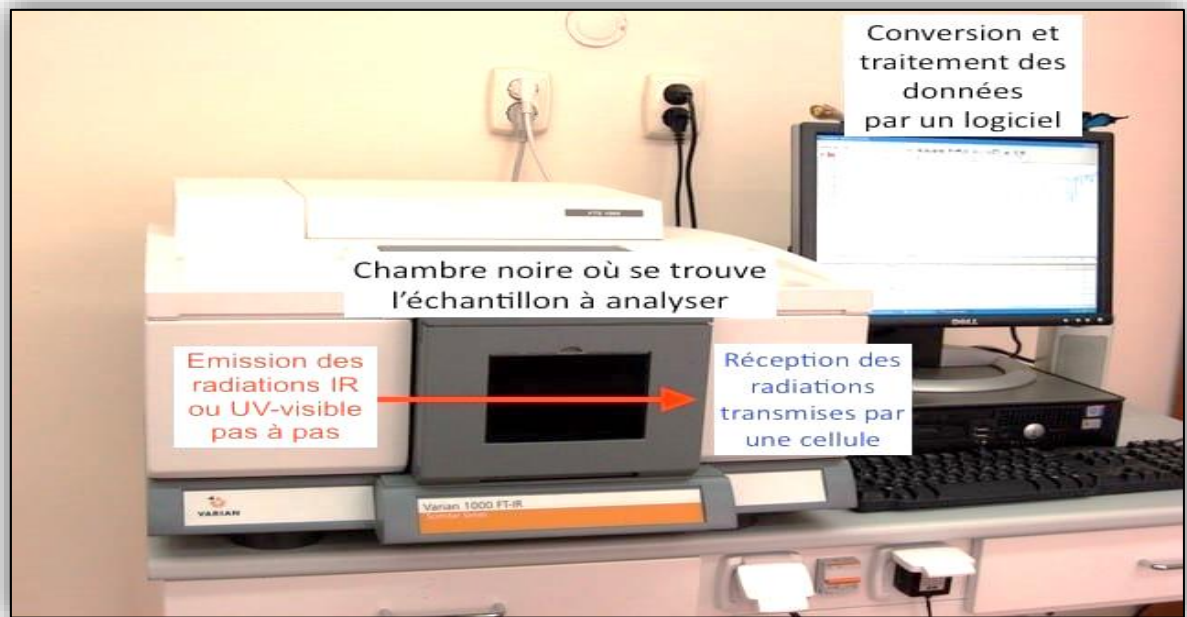


Fig (IV.40): Principe de fonctionnement d'équipement FTIR [16].

IV.12. Caractérisations tribologiques

IV.12.1. Le coefficient de frottement

Est une propriété du système, formant le contact, sa valeur dépend entre autres de :

- Facteurs mécaniques : force normale, vitesse de déplacement, viscosité du lubrifiant.
- Facteurs chimiques : humidité, oxydants, additifs.
- Propriétés des matériaux : dureté, plasticité, énergie de surface.

Les lubrifiants sont couramment utilisés pour réduire le frottement dans tous les systèmes de mouvement, ce qui peut réduire le coefficient de frottement à des valeurs inférieures à 0,1. Le frottement doit être faible bien que de nombreux cas exigent un coefficient de frottement élevé, comme le pneu et le sol malgré le coefficient de frottement élevé [19].

IV.12.2. Contact tribologique ponctuel

Dans le cas d'un tribomètre bille sur plan, la connexion hertzian permet d'accéder au coefficient de frottement et aux paramètres standard de tout ce système tribologique en fonction du mode de fonctionnement. Ces analyses sont dévastatrices et peuvent tester des échantillons rectangulaires et circulaires. Deux facteurs peuvent être modifiés, à savoir la vitesse de frottement et la charge applicable [20].

IV.12.3. Tests tribologiques

L'échantillon subit un déplacement rotatif ou alternatif en contact avec la bille en alumine (Al_2O_3) ou l'os montée sur un bras élastique sur la surface de l'échantillon durant 20mètre qui correspond approximativement à 17 min. Cependant ce processus nous a permet de trouver empiriquement la valeur de coefficient de frottement « μ » [21].



Fig (IV.41): Un tribomètre [10].

Les essais tribologiques ont été réalisés à l'aide d'un tribomètre de marque CSM Instrument dopé avec un logiciel sur PC en configuration pion-plan *figure II.2*.

Les conditions des essais sont résumées dans le tableau III-2 [21].

Tableau (IV.4) : Les conditions des essais tribologiques [21].

Les conditions	Valeurs
Vitesse	2 [cm/s]
Force normale	5 [N]
Condition d'arrêt	20 [m]
Taux d'acquisition	31 [hz]
Température	25 [°c]
Atmosphère	Air
Humidité	50 [%]

IV.13. Conclusion

La tribologie du contact sec est très complexe et reste difficile à modéliser, car le contact a lieu essentiellement aux sommets des aspérités de contact. Dans ces zones sont présents des échauffements excessifs, de l'arrachement de matière, des déformations plastiques et de l'endommagement.

Ce chapitre traite des étapes de base du développement et des micros structuraux initiales sur la substance AL₂O₃.

L'alumine a été formée par broyage, pressage et frittage naturel, ce qui a nécessité la production d'alumine à partir de la mise en service du site de gibbsite à une température de 1400 ° C.

Par broyage mécanique SEM et DEX. La formulation de poudres d'alumine pour les nanostructures a été effectuée. Le résultat des molécules de poudre est le phénomène de frottement et de traumatisme que nous montrons micrographie de taille et de forme.

Pendant le processus de broyage, la largeur des pics de déviation et leur intensité réduite sont causées par la diminution du volume des cristaux, et l'augmentation de la vitesse de composition précise des différents stades.

Nous avons rencontré le problème du manque de matériels et d'équipements pour mener des expériences appliquées pour mener le processus de tribologie.

Dans ce chapitre, nous avons étudié divers systèmes tribologiques analysant l'attitude et le comportement de frottement des techniques céramiques de caractérisation des microstructures utilisées, le comportement à l'usure et au frottement de la céramique à savoir :

- Techniques de caractérisation microstructurale (FTIR, MEB, DRX, ...);
- Caractérisations tribologiques.

CONCLUSION GENERALE

CONCLUSION GENERALE

Notre travail consiste en une synthèse d'élaboration et étude microstructurale et tribologique, en laboratoire d'une prothèse totale de hanche en nano biocéramique.

Premièrement, nous avons présenté une synthèse bibliographique en trois chapitres dans laquelle on a d'abord décrits la structure d'une prothèse de hanche ainsi que les biomatériaux. Les différents problèmes liés à l'usure mécanique et la science de tribologie.

Dans le quatrième chapitre, L'analyse par DRX et FTIR montre que la calcination de la gibbsite ($Al(OH)_3$) est réussite pour l'obtention de la phase alpha de l'alumine (Al_2O_3) avec une taille des grains moyenne, de structure hexagonale compacte (HC), ce résultat a été confirmée par le microscope électronique à balayage.

Des méthodes expérimentales utilisées pour l'élaboration (calcination, broyage, compactage et frittage) et les différentes caractérisations ont été présentées. Plusieurs techniques ont été mises en œuvre pour la caractérisation structurale et tribologique à savoir MEB, DRX, FTIR, ...

Le processus de formation des poudres nano structurées de l'alumine par broyage mécanique a été suivi par MEB et par DRX. La micrographie MEB montre que la morphologie (taille, forme) des particules de poudres est le résultat des phénomènes de friction et choc. Pendant le broyage, l'élargissement des pics de diffraction et la diminution de leurs intensités sont causés par la diminution de la taille des cristallites et l'augmentation du taux de microdéformation des différentes phases.

La spectroscopie infrarouge permet de distinguer facilement les différentes variétés structurelles de ces alumines, et par conséquent être utilisée comme un diagnostic rapide pour confirmer ou infirmer la présence de ces composés. La spectroscopie infrarouge dans le domaine du lointain fournit des données plus détaillées pour caractériser les transformations de phase basées sur la présence des groupes AlO_4 , AlO_6 et éventuellement OH.

La stabilité de cette phase de l'alumine α faite en sorte qu'elle ne réagit pas avec le corps vivant et donc ne dégage pas des ions ce qui nous ramène à la définition de la biocompatibilité structurale d'où nous concluons que l'alumine α est biocompatible. Pour calculer le taux d'usure et le coefficient de frottement de l'alumine alpha il faut faire un test tribologique, le manque d'équipement nous a fait arrêter à ce stade de notre étude.

RÉFÉRENCES

BIBLIOGRAPHIE

Références Bibliographiques

- [1] J-L. Fanchon : Guide pratique des sciences et technologies industrielles. Nathan, 2003.
- [2] F. Esnault: Construction mécanique - Transmission de puissance - Tome 1 : Principes et Écoconception. Dunod, 2009.
- [3] A. Caignot, V. Crespel, M. Dérumaux, C. Garreau, B. Martin, A. Redondoet S. Roux :Sciences Industrielles de l'Ingénieur - MP/MP*, PSI/PSI*, PT/PT*. Vuibert, 2014.
- [4] C. Lefteri: Procédés de fabrication et design produit. Dunod, 2014.
- [5] Université Bordeaux 1 Association MTech: Matériaux et propriétés. 2006.
- [6] UTC Compiègne : Données et rappels sur les matériaux, leurs propriétés et les procédés. 2000.
- [7] Y. JORAND, « *Elaboration et caractérisation de composites dispersoïdes ternaires base Alumine-Zircone a vocation thermomécanique*», Thèse de Doctorat, (INSA de Lyon, GEMPPM), (1991).
- [8] LOUET, N. « *Influence du dopage à la silice ou à l'oxyde de calcium sur le frittage et sur l'évolution microstructurale d'une alumine-alpha ultra pure* », Thèse de Doctorat, INSA de Lyon, (2003).
- [9] PHILIPS, D. S. et al. « *Precipitation in star sapphire. III Chemical effects accompanying precipitation* », Phil. Mag, (1980).
- [10] BELHOUCHE H. « *Elaboration et caractérisation d'un composite a dispersives à base d'alumine et de zircon* », Thèse de Doctorat, UFA-SETIF, (2008).
- [11] J.S. Benjamin, « *Metallurgical transaction 1* », (02 février 1970), 2943-2951.
- [12] ERIC G, Gérard L.C. « *Chapitre 19 : Broyage Mécanique* », www.researchgate.net/publication/236894806, (2006).
- [13] Luis Rafael OLMOS NAVARRETE« *Etude du frittage de poudres par microtomographie in situ et modélisation discrète* », Thèse Doctorat, Institut polytechnique de Grenoble, (2009)
- [14] M. Descamps, « *Frittage et évolution microstructurale de céramiques de type oxide. Application à l'alumine et à la zircone yttrée* », thèse, Institut National Polytechnique de Grenoble et de l'Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint Etienne, France, 328 pages (1991).

- [15] Aydemir Güralp Ural, « *performances en frottement de composites Alumine-Metal avec ou sans nanotubes de carbone : identification des conditions de grippage et des mécanismes d'usure* », Thèse Doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse (INP Toulouse), (2011)
- [16] <https://photobioschool.ru/en/methods-en/ftir-spectroscopy/>
- [17] Frédéric SERNA, Jean LA GNEAU, Jean-Marc CARPENTIER, « *Diffraction des rayons X et Catalyse* », Centre de Recherches de l'Industrie Belge de la Céramique, octobre 2014
- [18] I. RAHIL, « *élaboration et caractérisation de revêtement durs Mo-Cr et Mo-Cr-N* », Thèse de magister, Université Mentouri constantine, (2008).
- [19] Said BENZAADA, M.T. BOUZIANE, « *Tribologie, principes et matériaux* ».
- [20] IKEN M, BOUTAMINE H, « *Etude métallurgiques et tribologique d'une prothèse totale de hanche (PTH) en alliage à base de titane : ti-6al-7nb* », Mémoire Master, Université Abbes Laghrour, Khenchela, (2016).
- [21] HEBBAZ A, « *Etude de comportement tribologique de l'alliage ti-ni-Cu* », Mémoire master, ENSMM -Annaba-, (2016).
- [22] BOUSSAFEL H, « *Etude comparative tribologique et physicochimique d'un acier 316L et TA6V4* », Mémoire master, ENSMM-ANNABA, (2016).
- [23] CHANBI D, « *Elaboration, caractérisation des alliages Fe1-X-Y ALX CRY et étude du comportement à l'oxydation haute température* », Mémoire de magister, Université de Annaba, (2006).
- [24] HAMDAOUI A, ATHMANI C, « *Etude des évolutions structurales de la Gibbsite calcinée : Analyse par diverses méthodes d'investigation (TG, ATD, MEB, DRX et FTIR)* », Mémoire de Master, Université de Abbas Laghrour Khenchela, (2011).
- [25] GRAFOUTE M. « *Etude des propriétés structurales et modélisations des poudres nanostructurées de fer obtenues par broyage mécanique* », Thèse doctorat, Université du Maine, (2004).
- [26] GHERIB M. « *Elaboration et caractérisation des matériaux nanostructurées et leurs propriétés physiques et mécaniques* », Thèse doctorat, Annaba, (2013).

[27] ERHART H. « *Itinéraires géochimiques et cycle géologique de l'aluminium* », DOIN, Ed, S. A. (1973), P. 11-16.

[28] V. J. INGRAM-JONES, et AL, « *Dehydration sequence of gibbsite and boehmite :study of differences between soak and flash calcination and of particle-size effects* », J. Mater. Chem., (1996), 6 (1), P. 73-79.

[29] C. A. JOUENNE, « *Traité de céramiques et Matériaux Minéraux* », Ed, SEPTIMA, Paris (1990).

[30] HAMDAOUI A, ATHMANI C, « *Etude des évolutions structurales de la Gibbsite calcinée : Analyse par diverses méthodes d'investigation (TG, ATD, MEB, DRX et FTIR)* », Mémoire de Master, Université de Abbas Laghrour Khenchela, (2011).

ABSTRACT

The aim of this work is to elaborate to study the microstructural and tribological behavior of a nanobioceramic for total hip prosthesis. After the elaboration of the material (Al_2O_3) from the calcination of the gibbsite ($\text{Al}(\text{OH})_3$) at a temperature of 1400°C , the calcined material was milled using a Fritsch planetary mill to obtain a powder. The crushed powder is formed into pellets by cold compression and then sintered naturally at a temperature of 1000°C . The microstructure of the resulting material is evaluated by microstructural characterization techniques, using an X-ray diffractometer, a scanning electron microscope, and an infrared spectroscopy of FTIR (Physics laboratory of the brothers Mentouri – Constantine and physical and biological research laboratories of Abbes Laghrour university – Khenchela) which shows that the alumina obtained is of an alpha phase that it is the most stable phase what justifies the biocompatibility structural of this material.

We are also interested in the study of tribological behavior by means of the tests of wear in alternative contact using a tribometer type ball on plan. These tests consist in measuring the loss of mass and the coefficient of friction of studied material under different conditions, load and slip speed confirmed by the bibliographic results and respect the standards imposed by the field of biomedical in particular at the level of the joint surface condition of hip prostheses.

Keywords: *Tribology, milling, calcination, formed, total hip prosthesis, Al_2O_3 , $\text{Al}(\text{OH})_3$, nanobioceramic, friction, wear, alpha phase, biocompatibility.*

RESUME

Le but de ce travail est l'élaboration et l'étude de comportement microstructural et tribologique d'un nanobiocéramique utilisé dans la prothèse totale de la hanche. Après l'élaboration du matériau (Al_2O_3) à partir de la calcination de la gibbsite ($Al(OH)_3$) à différentes températures, le broyage du matériau calciné a été effectué à l'aide d'un broyeur planétaire Fritsch pour obtenir une poudre fine, qui est mise en forme des pastilles par compression à froid puis frittée naturellement à une température de $1000^\circ C$. La microstructure de matériau résultant est évaluée par des techniques de caractérisation microstructurales, en utilisant un diffractomètre des rayons X, un microscope électronique à balayage, et un spectroscope infrarouge de type FTIR (*Laboratoire de Physique Université des Frères Mentouri – Constantine et au Laboratoires de recherche Physique et Biologique Université Abbés Laghrour de Khenchela*) qui montre que l'alumine obtenu est d'une phase alpha (α) qui est la phase la plus stable ce que justifier la biocompatibilité structurale de cet matériau.

On est intéressé aussi à l'étude du comportement tribologique au moyen des tests d'usure en contact alternatif utilisant un tribomètre type bille sur plan. Ces tests consistent à mesurer la perte de masse et le coefficient de frottement de matériau étudié sous différentes conditions, de charge et de vitesse de glissement pour confirmer les résultats bibliographiques et respectent les normes imposées par le domaine du biomédical notamment au niveau de l'état de surface articulaires des prothèses de hanche.

D'autres méthodes d'élaboration et l'étude de comportement microstructural et tribologique obtenues à différentes résolutions par d'autres chercheurs, pourraient faire l'objet d'analyse statistique supplémentaire, de calcination, broyage et frittage afin d'enrichir la banque de données de la recherche. Une autre perspective est de faire une expérience sur l'étude tribologique.

Mots clés : *nanobiocéramique, Al_2O_3 , $Al(OH)_3$, calcination, broyage, mise en forme, prothèse totale de hanche, tribologie, phase alpha, biocompatibilité, frottement, usure.*

ملخص

الهدف من هذا العمل هو إعداد مادة الألومين ودراسة السلوك المجهرى والسلوك الاحتكاكي لهذه المادة المستعملة لمفصل الورك، بعد الحصول على هذه المادة عن طريق عملية التكلّيس لمادة الجيبسيت ($Al(OH)_3$) تحت درجات حرارة مختلفة، تم طحن الجيبسيت المكس بواسطة مطحنة من نوع فريتش من أجل الحصول على مسحوق رطب الذي تم تشكيله على البارد عن طريق الضغط لتمر هذه العينة بعملية التلبيد تحت درجة حرارة 1000 درجة مئوية، وللحصول على نتائج دراسة السلوك المجهرى تم إستعمال كل من جهاز الأشعة السينية، المجهر الالكتروني الماسح وكذا جهاز الأشعة فوق الحمراء.

تعتمد دراسة مقاومة الكشط والكلل على استخدام الات اختبار في ظروف معينة، الهدف منها هو قياس ضياع الكتلة ومعامل الاحتكاك لمادة Al_2O_3 . هناك أساليب أخرى للإنجاز ودراسة سلوك التركيب المجهرى، والاحتكاكي التي تم الحصول عليها في قرارات مختلفة من الباحثين الآخرين والتي يمكن أن تكون إضافة لموضوع التحليل الإحصائي للتكلّيس، الطحن والتلبيد لإثراء بنك بيانات البحوث منظور آخر للقيام بتجارب أخرى لدراسة الاحتكاك.

كلمات مفتاحية : نانوبيوسيراميك، Al_2O_3 , $Al(OH)_3$ ، التكلّيس، الطحن، التشكيل، مفصل الورك الكلي، علم الاحتكاك، التآكل، المرحلة ألفا، الاحتكاك.