

République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de l'Enseignement Supérieur  
et de la recherche scientifique

UNIVERSITE Abderrahmane MIRA BEJAIA  
Faculté de Technologie  
Département de Génie Mécanique

MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du diplôme de

**MASTER**

Filière : Génie Mécanique

Spécialité : Construction Mécanique

Par :

**AZZGAGH Nouredine**

**RAIAH Said**

**Thème**

---

***L'influence de la distribution des contraintes résiduelles sur la  
dureté et la rugosité des pièces en céramique***

---

Soutenu le 02/07/2023 devant le jury composé de :

M <sup>me</sup> . Adjouadi.N	Présidente
Mr. Bensaid.N	Rapporteur
Mr. Harrouche.F	Examineur

**Année Universitaire 2022-2023**

## ***Remerciements***

*Je remercie Dieu pour le peu de savoir qu'il nous a permis d'acquérir. Ainsi, nous tenons à remercier chaleureusement et spécialement Mr : BENSAID.N notre promoteur pour avoir accepté de prendre en charge l'encadrement de notre recherche.*

*Nous exprimons bien entendu nos remerciements les plus sincères aux membres de jury ainsi que le président de jury pour avoir accepté d'examiner notre travail.*

*Nous remercions tout l'ensemble du corps enseignant de la Faculté de technologie, qui ont contribué à notre formation, en particulier les enseignants du Département Génie Mécanique.*

*A tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce mémoire.*

*Merci.*

## *Dédicace*

*Je dédie ce modeste travail accompagné d'un profond amour à :*

*A celle qui a insérée le goût de la vie et le sens de la*

*Responsabilité...merci chère maman.*

*A celui qui a été toujours la source d'inspiration*

*Et du courage ...merci chère père.*

*A mes frères et sœurs qui ont partagé avec moi tous les moments d'émotions lors de la réalisation de ce travail. A ma famille : Omar, Bilal, Nabil, Zazak, Anissa,*

*Zinou. A tous mes ami(e)s que j'ai connus dans ma vie.*

*A tous ceux qui sèment le bonheur dans mon chemin*

*Noureddine*

## *Dédicace*

*C'est avec un grand plaisir que Je dédie ce modeste travail :*

*À Ma mère qui a été pour moi une lumière qui me guide vers le bon chemin.*

*À Mon cher père qui a été mon soutien pour atteindre ce niveau.*

*À mes sœurs et mes frères qui n'ont pas hésité à m'aider et m'encourager.*

*À toute la famille.*

*À tous les amis, qui m'ont apporté affection et soutien lors de la réalisation de ce travail.*

*A toute personne ayant contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail.*

*A tous les étudiants du génie mécanique.*

*Said*

# Sommaire

<i>Remerciements</i> .....	<b>i</b>
<i>Dédicace</i> .....	<b>ii</b>
<i>Dédicace</i> .....	<b>iii</b>
Sommaire .....	<b>iv</b>
Liste des figures .....	<b>viii</b>
NOMENCLATURE .....	<b>x</b>
Introduction Générale .....	<b>1</b>
<b>Chapitre I Généralités sur les céramiques</b>	
Introduction .....	<b>2</b>
I Généralités sur les céramiques .....	<b>2</b>
I.1 Définition .....	<b>2</b>
I.2 Les types des céramiques .....	<b>2</b>
I.2.1 Les céramiques traditionnelles.....	<b>2</b>
I.2.2 Les céramiques techniques.....	<b>4</b>
I.2.2.1 Les céramiques à base d'oxydes .....	<b>5</b>
I.2.2.2 Les céramiques non-oxydes .....	<b>6</b>
I.3 Procédés de fabrication des produits céramiques .....	<b>7</b>
I.3.1 Matière première .....	<b>7</b>
I.3.2 Mise en forme .....	<b>8</b>
a) Voie liquide.....	<b>8</b>
b) Voie plastique .....	<b>9</b>

c) Voie sèche .....	10
I.3.3 Séchage.....	11
I.3.4 Frittage.....	12
I.4 Les matières premières des céramiques .....	13
I.4.1 Matières premières plastiques .....	13
I.4.2 Matières premières non plastique.....	13
I.4.3 Matières premières des vernis et couleurs.....	14
I.5 Domaine d'utilisation de la céramique .....	14
I.6 Les caractéristiques des céramiques.....	16
I.6.1 Applications .....	16
I.7 Propriétés des céramiques .....	16
I.7.1 Propriétés physiques .....	16
I.7.2 Les propriétés chimiques.....	17
I.7.3 Propriétés thermiques .....	18
I.7.4 Propriétés mécaniques .....	18
I.8 Les essais mécaniques .....	19
I.8.1 L'essai de dureté.....	19
I.8.1.1 Essai BRINELL .....	20
I.8.1.2 L'essai VICKERS .....	21
I.8.1.3 L'essai ROCKWELL.....	22
I.8.2 L'essai de rugosité .....	23
I.8.2.1 Définition de la rugosité.....	23
I.8.2.2 Principaux critères de rugosité.....	23
a) Rugosité totale $R_t$ .....	23
b) Rugosité $R_z$ .....	23
c) Rugosité $R_a$ .....	23
d) Rugosité maximum $R_{max}$ .....	24
e) Rugosité $R_p$ .....	24
I.9 Module de Young et coefficient de poisson.....	25
I.9.1 Module de Young.....	25
I.9.2 Coefficient de poisson.....	25
Conclusion .....	25

## Chapitre II Généralités sur l'usinage par fraisage

Introduction.....	26
II.1 Le Fraisage.....	26
II.2 Classification des fraiseuses.....	27

II.2.1 Fraiseuse universelle .....	27
II.2.2 Fraiseuse verticale.....	27
II.2.3 Fraiseuse horizontale .....	28
II.2.4 Fraisage à commande numérique par ordinateur.....	29
II.3 Procédés de fraisage.....	30
II.3.1 Fraisage en bout .....	30
II.3.2 Fraisage en roulant .....	30
II.3.3 Fraisage combiné .....	31
II.4 Les différents types d'opérations en fraisage.....	31
II.4.1 Surfaçage .....	32
II.4.2 Plans épaulés .....	32
II.4.3 Rainurage .....	32
II.5 Les différents types d'outils.....	33
II.5.1 Outils ARS (acier rapide supérieur).....	33
II.5.2 Outils carbure .....	33
II.5.3 Outils de perçage.....	34
II.6 Les paramètres de coupe .....	35
II.6.1 La vitesse de rotation de la broche .....	35
II.6.2 La vitesse de coupe.....	35
II.6.3 L'avance .....	36
II.6.4 L'avance par tour .....	36
II.6.5 L'avance par dent .....	36
II.6.6 La profondeur de passe.....	37
II.6.7 Le volume de matière enlevée par unité de temps .....	37
II.7 Polissage .....	38
Conclusion .....	38

### Chapitre III Partie expérimentale

Introduction.....	39
III Objectif de travail .....	39
III.1 Matériaux et machine utilisé.....	39
III.1.1 Le matériau utilisé.....	39
III.1.2 Opération d'usinage utilisé .....	40
III.1.2.1 Le surfaçage .....	40
III.1.2.2 Machine utilisé .....	40
III.1.2.3 Outil utilisé.....	41
III.1.2.4 Le polissage .....	41
III.2 Les essais appliqués.....	42

---

III.2.1 Essai de dureté.....	42
III.2.1.1 Procédure de l'essai .....	42
III.2.2 Mesure de rugosité .....	44
III.2.2.1 Procédure de l'essai .....	44
III.3 Résultats et interprétations .....	44
III.3.1 Test de dureté Vickers.....	44
III.3.2 Test de rugosité.....	46
III.3.3 Dureté en fonction de rugosité .....	47
Conclusion .....	48
Conclusion Générale.....	51
Références Bibliographiques.....	50
Résumé.....	52
Abstract .....	52

## Liste des figures

Figure I.1 : Les différentes familles des céramiques traditionnelles [3].....	3
Figure I.2 : Les différentes familles des céramiques Techniques .....	5
Figure I.3 : Les différentes applications des céramiques techniques [6].....	5
Figure I.4 : Céramique à base d'oxyde .....	6
Figure I.5 : Céramique non oxyde .....	6
Figure I.6 : Première étape de fabrication de céramique [8].....	8
Figure I.7 : Deuxième étape de fabrication de céramique [8].....	8
Figure I.8 : Procédé de coulage en bande (a) [9] ; moule de coulage étapes (b) .....	9
Figure I.9 : Injection plastique .....	9
Figure I.10 : Schéma du pressage axial et pressage isostatique [10].....	10
Figure I.11 : Troisième étape de fabrication de céramique [8].....	12
Figure I.12 : Feldspath et quartz [12] .....	14
Figure I.13 : Courbes rationnelles typiques de différents matériaux.....	17
Figure I.14 : Duromètre universel [17].....	19
Figure I.15 : Essai de brinell [17].....	20
Figure I.16 : Principe de l'essai de dureté VICKERS [4] .....	21
Figure I.17 : Principe de l'essai de dureté ROCKWELL b et ROCKWELL c [4] .....	22
Figure I.18 : Rugosité arithmétique [19] .....	24
Figure I.19 : Principaux critères de rugosité [19].....	24
Figure I.20 : Courbes contraintes déformations .....	25
Figure II.1 : Enlèvement de matière par le fraisage .....	26
Figure II.2 : Fraiseuse universelle [23] .....	27
Figure II.3 : Fraiseuse vertical [24] .....	28
Figure II.4 : Fraiseuse horizontale [24] .....	29
Figure II.5 : Fraisage à commande numérique [26] .....	29
Figure II.6 : Fraisage en bout [27] .....	30
Figure II.7 : Fraisage en roulant [27] .....	31
Figure II.8 : Fraisage combiné [27] .....	31
Figure II.9 : Le surfaçage [28] .....	32
Figure II.10 : L'épaulement [28] .....	32
Figure II.11 : Le rainurage [28] .....	32
Figure II.12 : Les outils de fraisage en ARS [29] .....	33
Figure II.13 : Outils carbure .....	34
Figure II.14 : Outils de perçage .....	34
Figure II.15 : La vitesse de rotation de la broche [22] .....	35
Figure II.16 : La vitesse de coupe [22] .....	36
Figure II.17 : Le volume de matière enlevée par unité de temps [22] .....	37

Figure III.1 : Composite de céramique et polyamine .....	39
Figure III.2 : Le surfaçage .....	40
Figure III.3 : Fraiseuse horizontale modèle FH 1.6.....	41
Figure III.4 : Fraise à surfacer.....	41
Figure III.5 : Le polissage de l'échantillon.....	42
Figure III.6 : Le duromètre d'université de Bejaia, Qness 250 CS .....	43
Figure III.7 : L'empreinte de pénétration .....	43
Figure III.8 : Le rugosimètre d'université de Bejaia, LITESURF SOMECO .....	44
Figure III.9 : Dureté à proximité du centre de la pièce.....	45
Figure III.10 : Dureté à proximité de l'extrémité de la pièce .....	45
Figure III.11 : Rugosité arithmétique moyenne Ra de surface au voisinage du centre de la pièce.....	46
Figure III.12 : Rugosité arithmétique moyenne Ra de surface au voisinage de l'extrémité de la pièce.....	46
Figure III.13 : Variation de la dureté en fonction de la rugosité à proximité du centre de la pièce.....	47
Figure III.14 : Variation de la dureté en fonction de la rugosité à proximité du l'extrémité de la pièce .....	48

# NOMENCLATURE

<b><u>Symboles</u></b>	<b><u>Définition</u></b>	<b><u>Unité (SI)</u></b>
HB	Dureté brinell	
F	Force	N
D	Diamètre	mm
d	Diamètre de l'empreinte	mm
Hv	Dureté Vickers	
HR	Dureté Rockwell	
E	Module de Young	Mpa
$\nu$	Coefficient de poisson	
$\sigma$	Contrainte appliqué	Mpa
$\epsilon$	Déformation plastique	mm
$\epsilon_r$	Déformation plastique représentative	
Rt	Rugosité totale	$\mu\text{m}$
Ra	Rugosité arithmétique moyenne	$\mu\text{m}$
Rz	Rugosité moyenne profondeur	$\mu\text{m}$
Rmax	Rugosité maximale de hauteur	$\mu\text{m}$
Rp	Rugosité maximale de saillie	$\mu\text{m}$
N	Vitesse de rotation	tr/min
Vc	Vitesse de coupe	m/min
Vf	Vitesse d'avance	mm/min
f	Avance par tour	mm/tr
fz	Avance par dent	mm/dent
Z	Nombre de dent de l'outil	
Q	Débit de copeau	$\text{cm}^3/\text{min}$
a <sub>e</sub>	Profondeur de passe axial	mm
a <sub>p</sub>	Profondeur de passe radial	mm

# **Introduction Générale**

# Introduction Générale

Généralement les matériaux céramiques comprennent deux grands groupes : les céramiques traditionnelles et les céramiques techniques. Les céramiques traditionnelles sont obtenues par la mise en forme à l'état plastique et par addition d'eau, ensuite cuisson.

Les céramiques techniques se distinguent des céramiques traditionnelles par une température de mise en forme plus élevée, un contrôle plus précis des éléments constitutifs et des procédés de mise en forme particuliers et plus rigoureux.

Les composites en céramique sont utilisés dans divers domaines, tels que l'ingénierie, l'industrie automobile, l'aérospatiale, l'électronique et la fabrication d'outils. Ces matériaux peuvent présenter des caractéristiques améliorées, notamment une meilleure résistance aux chocs, une plus grande stabilité thermique, une résistance à l'usure accrue, une conductivité électrique ou thermique améliorée.

La dureté et la rugosité sont deux caractéristiques essentielles pour évaluer la qualité d'une pièce en céramique. La dureté est une mesure de la résistance d'un matériau à la pénétration d'un corps étranger, tandis que la rugosité décrit la texture de surface d'une pièce. Ces deux propriétés peuvent être affectées par la distribution des contraintes résiduelles.

La compréhension de l'influence de la distribution des contraintes résiduelles sur la dureté et la rugosité des pièces en céramique est essentielle pour optimiser les procédés de fabrication et améliorer les performances des matériaux céramiques.

Dans le premier chapitre on présente une recherche bibliographique basée sur la définition et les différentes classes des céramiques et leur procédé de fabrication avec quelques rappels sur leurs principales caractéristiques et leur domaine d'applications et leurs propriétés.

Le deuxième chapitre est consacré à l'étude bibliographique qui permet de rappeler les principales notions de base de la fraiseuse et une étude théorique qui donne les formules des paramètres de coupe.

Dans le troisième chapitre nous présentons la méthode d'élaboration des échantillons ainsi que l'analyse et la discussion des différents résultats pour chaque cas étudié.

Nous terminons ce mémoire par une conclusion générale et une liste des références bibliographiques utilisées.

# **Chapitre I**

## **Généralités sur les céramiques**

## Introduction

La céramique est l'art de fabriquer des poteries, fondé sur les propriétés des argiles pour donner avec l'eau une pâte plastique facile à façonner, devenant dure, solide et inaltérable après cuisson.

## I Généralités sur les céramiques

### I.1 Définition

La céramique (du grec *keramikos*, « argile cuite ») est le premier matériau que l'homme ait fabriqué par transformation de matières premières. C'est l'art dont les procédés ont le moins changé : on façonne une pâte que l'on cuit dans un four pour effectuer la transmutation de matière qui aboutira à un objet de céramique. Les céramiques doivent leurs qualités distinctives tant à la composition de la pâte qu'aux modalités de cuisson. Les premières céramiques employées étaient les silicates. Elles étaient utilisées pour les poteries émaillées. Elles ont connu ensuite une utilisation plus étendue allant de la porcelaine aux appareils sanitaires. Les oxydes purs, les carbures, les borures, les nitrures, les siliciures, les sulfures ont été successivement inclus dans la catégorie des céramiques. [1]

### I.2 Les types des céramiques

Les matériaux céramiques peuvent être subdivisés en deux groupes : les céramiques traditionnelles et les céramiques techniques :

#### I.2.1 Les céramiques traditionnelles

Les céramiques traditionnelles modernes parfois appelées aussi conventionnelles ou silicatés c'est-à-dire les principales composés sont à base de la silice ( $\text{SiO}_2$ ), elles représentent plus de 80 % de la croûte terrestre provient de l'oxygène. Où elles sont produit en grandes quantités et consiste par des matières naturelle d'un bon marché.

Elles sont élaborés à partir de mélanges de plusieurs matières premières minérales et brutes tels que (l'argile, kaolin, feldspath, et quartz), et généralement mise en œuvre par coulée (barbotine) pour la mise en forme par un procédé de compaction puis traités thermiquement à une température comprise entre 950 et 1400 °C.

Les céramiques traditionnelles sont de grande diffusion qui sont abondamment utilisés dans divers secteurs (bâtiments, travaux publics, articles domestiques, usages alimentaires et l'ornementation).

Les céramiques traditionnelles peuvent se classer en différentes familles :

- Les terres cuites, préparées entre 950 et 1050 °C, ont une porosité de 15 à 30 % (utilisations : Tuiles, briques, conduits et tuyaux, poteries).
- Les faïences sont obtenues entre 950 et 1100 °C, leur porosité varie entre 10 à 20 % (utilisations : équipements sanitaires, vaisselle, carreaux).
- Les grès, formés à partir de grains de sable enrobés d'argile, se préparent entre 1020 et 1300 °C, leur porosité est de l'ordre de 1 à 5 % (utilisations : carreaux de sol, tuyaux, équipements sanitaires).
- Les porcelaines ont une faible porosité (0 à 2 %), leur température d'élaboration situe entre 1100 et 1400 °C (utilisations : vaisselle, appareils de chimie, isolateurs électriques). [2]



Figure I.1 : Les différentes familles des céramiques traditionnelles [3]

### I.2.2 Les céramiques techniques

Dans toutes les spécialités de l'industrie de céramique, la céramique technique et la plus dynamique est très forte développement depuis une vingtaine d'années, en raison d'un degré d'innovation particulièrement élevé. Elles sont consistant de 20 % de la masse de la croûte terrestre provient de l'oxygène, et constitue de 30 % du marché et 8 % de croissance par an. Les céramiques techniques appelée aussi fonctionnelles ou avancée se sont principalement de composés non silicatées [oxydes, carbures, nitrures,...], elles sont élaborées par une autre matière première naturelle synthétisée et purifiée bien, et généralement mise en forme et traités thermiquement à des températures très élevées par rapport les céramiques traditionnelles.[4]



Les roulements en céramiques



Bougie automobile en céramique



Tubes capteurs en céramiques



Isolateur électrique

**Figure I.2 : Les différentes familles des céramiques Techniques**

Les céramiques techniques sont considérées comme l'un des matériaux les plus efficaces de notre temps, en raison de ses développements récents et renouvelables car c'est le groupe unique avec les propriétés les plus performantes telles que (mécanique, physique, optique) . Les céramiques techniques sont utilisées dans les différents domaines [5], représentant dans la figure suivante :

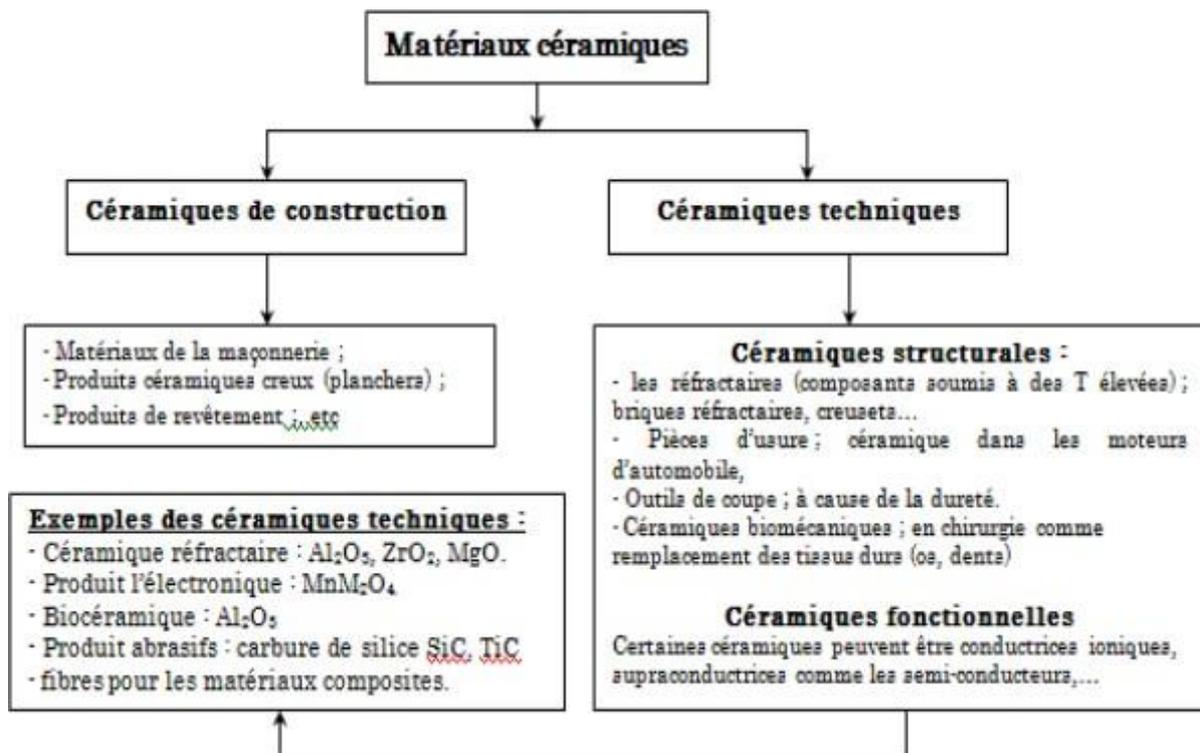


Figure I.3 : Les différentes applications des céramiques techniques [6]

### I.2.2.1 Les céramiques à base d'oxydes

Les céramiques oxydes se caractérisent par une température de fusion très élevée. Une grande stabilité chimique même à haute température, une résistance à l'oxydation évidente, une dureté élevée. L'ensemble de ces propriétés sont liées aux caractères fortement ioniques de leur liaisons.

Parmi les oxydes de plus utilisés pour les applications thermomécaniques citons l'oxyde d'aluminium appelé communément alumine, l'oxyde de zirconium et la cordiérite (2MgO 2Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 5SiO<sub>2</sub>). [6]



**Figure I.4 : Céramique à base d'oxyde**

### **I.2.2.2 Les céramiques non-oxydes**

Les céramiques non-oxydes se caractérisent par des températures de fusion ou de décomposition élevée, une bonne stabilité chimique même à haute température, une assez bonne résistance à l'oxydation, des duretés et des résistances mécaniques très élevées. Toutes ces propriétés sont liées au caractère fortement covalent de leurs liaisons interatomiques. Dès lors, on retrouvera ces céramiques en tant qu'abrasifs et outils de coupe grâce à leur dureté exceptionnelle et leur bonne ténacité ainsi que comme éléments de structure à moyenne et haute température milieu corrosif en raison de leur bonne tenue mécanique. [6]



**Figure I.5 : Céramique non oxyde**

### I.3 Procédés de fabrication des produits céramiques

#### I.3.1 Matière première

Les traitements que peut subir une matière première consistent en un concassage mécanique ou manuel selon les moyens disponibles, suivie d'un tamisage humide ou sec. Il est recommandé que le matériau utilisé comporte une bonne quantité de sable dégraissant ou de chamotte. Ceci aidera la pièce à supporter son poids lors du façonnage et du séchage. L'eau est ensuite ajoutée à la matière première d'une manière progressive jusqu'à l'obtention de la consistance souhaitée qui permet une bonne malléabilité dans le travail.

Après l'addition de l'eau à la matière première, cette dernière est malaxée soit par une malaxeuse, soit manuellement pour homogénéiser la distribution de l'eau, la pâte ainsi formée est pétrie afin de dégager le maximum de bulles d'air. Elle peut être gardée par la suite dans un stock pour plusieurs semaines ce qui aide à l'amélioration de sa plasticité par le processus de pourrissage. Selon le produit et la méthode de confection, la pâte peut être soit liquide, plastique ou granulée [7].

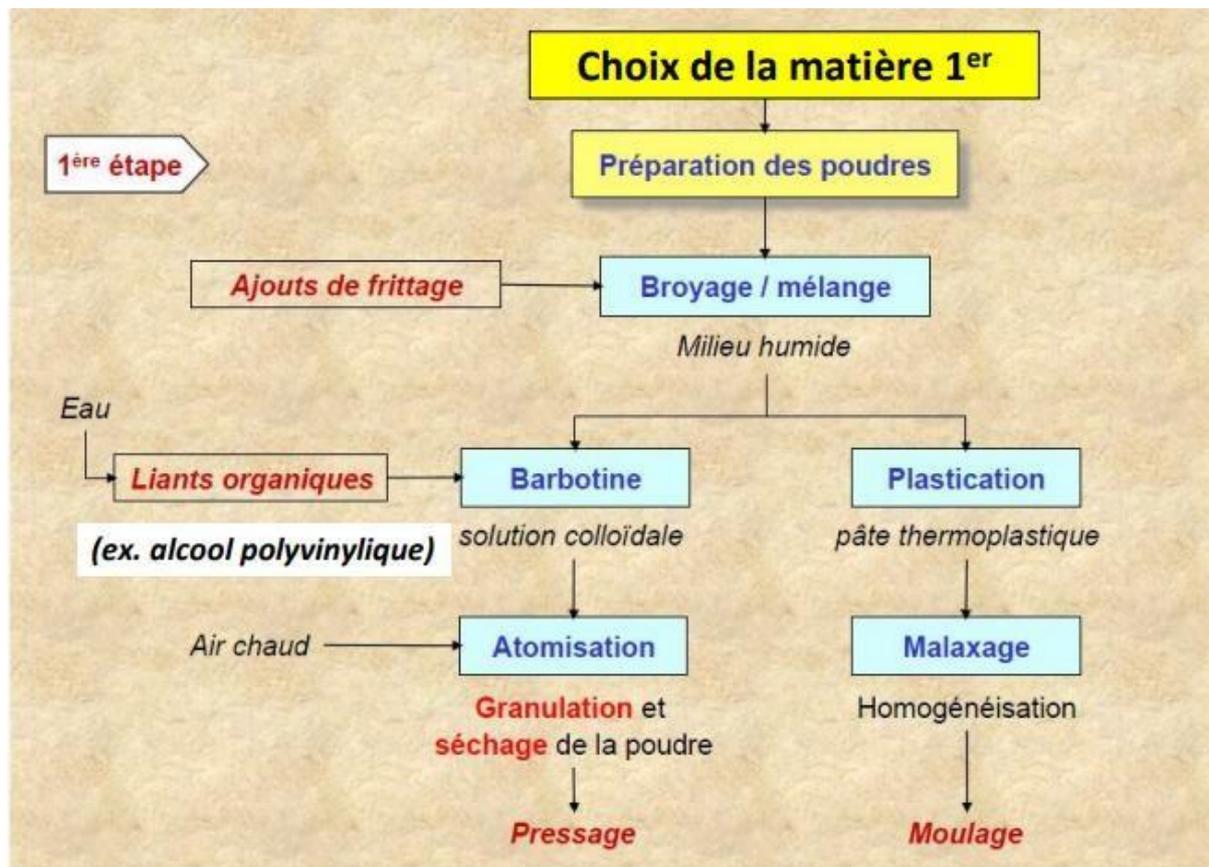


Figure I.6 : Première étape de fabrication de céramique [8]

## I.3.2 Mise en forme

La mise en forme est un thème essentiel dans la fabrication des céramiques (figure I.7). Les propriétés intrinsèques des céramiques, fragilité, dureté et très haut point de fusion, limite l'utilisation des méthodes classiques.

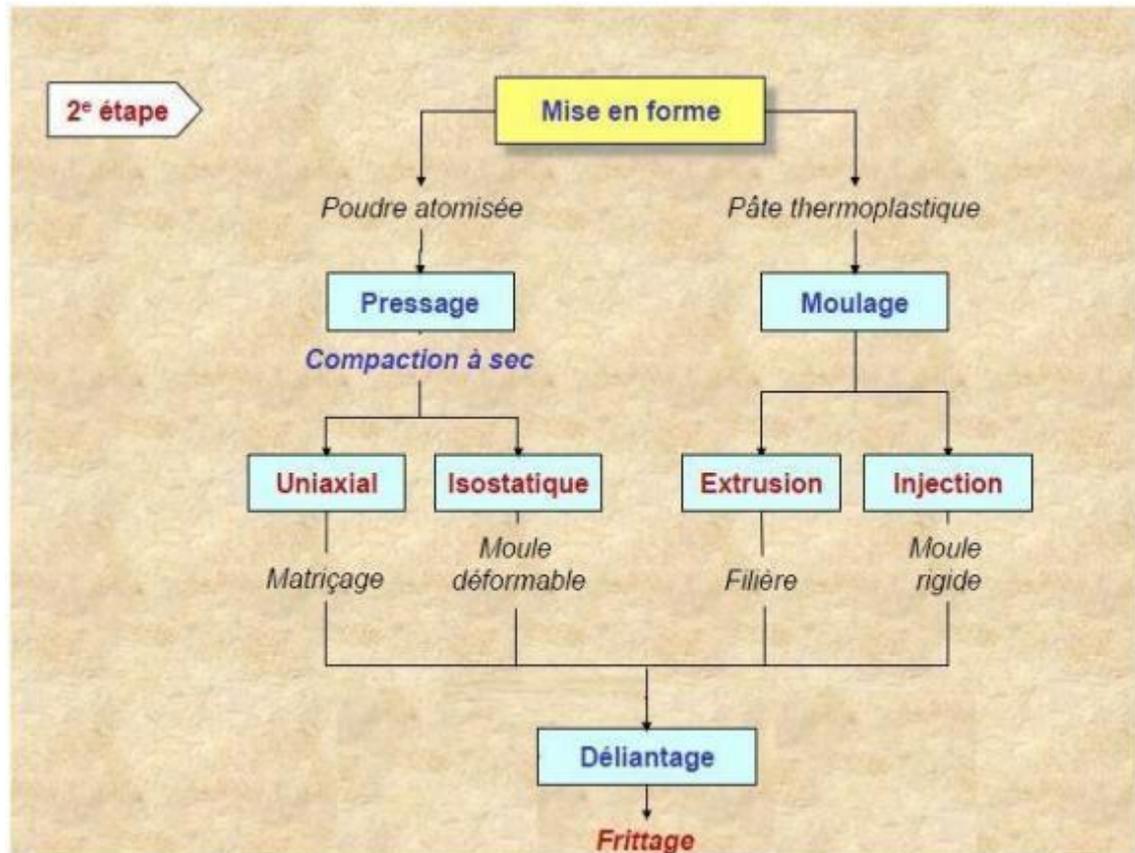


Figure I.7 : Deuxième étape de fabrication de céramique [8]

## a) Voie liquide

Dans les procédés en voie liquide, les poudres céramiques sont dispersées dans un solvant (eau, alcool) pour aboutir à une suspension (ou barbotine dans le cas de suspensions argileuses) aux propriétés souhaitées. Les procédés exploitant la voie liquide sont par exemple le coulage en moule et le coulage en bande. [9]

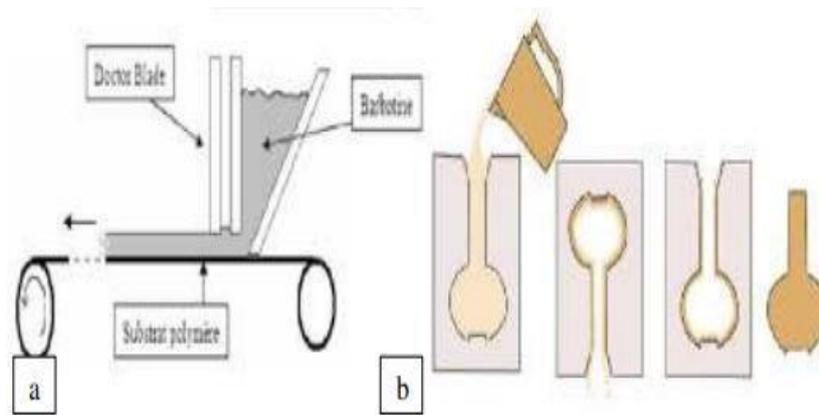


Figure I.8 : Procédé de coulage en bande (a) [9] ; moule de coulage étapes (b)

**b) Voie plastique**

Les procédés en voie plastique utilisent la déformation d'une pâte pour mettre en forme l'objet à fabriquer. Si les pâtes argileuses sont naturellement plastiques, il n'en est rien pour les poudres de céramiques techniques qui nécessitent d'être mélangées avec des matériaux organiques pour obtenir ce comportement rhéologique assimilé aux fluides anormaux. Les objets céramiques sont ensuite mis en forme par extrusion ou par injection.

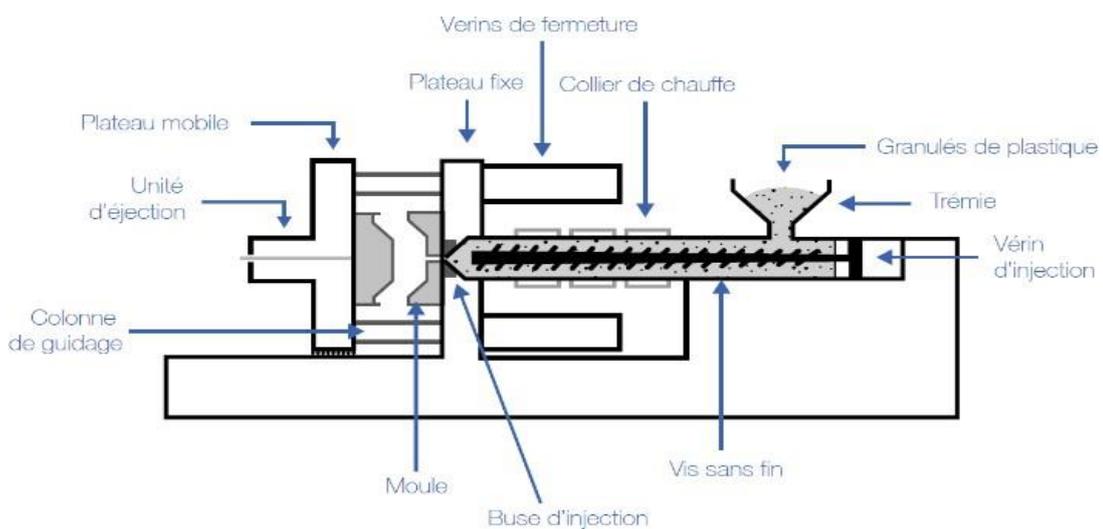


Figure I.9 : Injection plastique

## c) Voie sèche

Les procédés par voie sèche granulaire ont pour but d'agglomérer de façon contrôlée les poudres fines pour leur conférer une bonne aptitude à l'écoulement pour le remplissage des moules ainsi qu'une plasticité suffisante pour se déformer sous l'action du pressage. Une façon d'y parvenir est par exemple de réaliser une suspension, de la pulvériser sous forme de gouttelettes qui seront séchées par un courant d'air chaud (procédé d'atomisation). Les granules obtenus sont des amas sphériques des grains de la poudre initiale, et contiennent également les liants et les plastifiants préalablement ajoutés à la suspension.

## ❖ Mise en forme par pressage uni axial (matriçage)

-Pour réaliser des pièces simples (joints, bagues, carreau...).

-Compactage (20 à 150 MPa) : piston simple ou double effet.

## ❖ Mise en forme par pressage isostatique

Le pressage isostatique inclut certains produits hauts de gamme nécessitent une densification uniforme qui peut s'obtenir en appliquant la même pression sur toutes les surfaces. Dans une presse isostatique, on remplit des moules en caoutchouc ou en polyuréthane de poudre céramique et on les place dans une cuve remplie de liquide. On applique ensuite une pression hydrostatique élevée, puis on démoule les produits. Cette méthode est employée dans les secteurs des réfractaires et des céramiques techniques ainsi que dans la fabrication des carreaux et de la vaisselle de table.

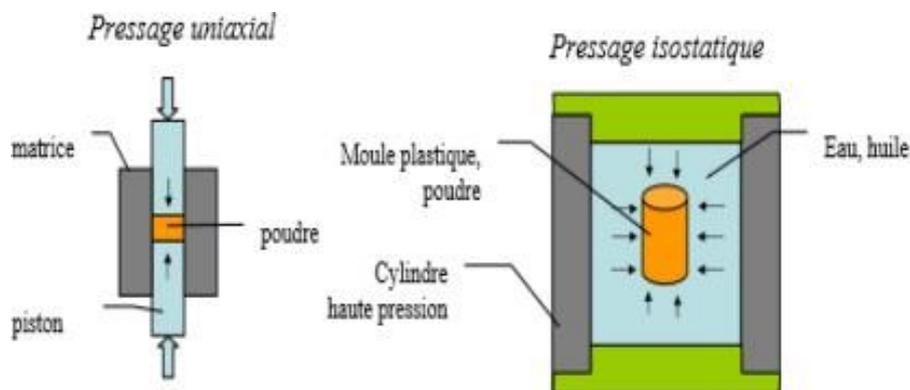


Figure I.10 : Schéma du pressage axial et pressage isostatique [10]

### I.3.3 Séchage

Quel que soit le mode de façonnage utilisé, la pâte céramique contient une quantité d'eau qu'elle est nécessaire d'évacuer avant la cuisson afin d'éviter la fente ou la casse de la pièce, dues à un échauffement trop rapide. Les méthodes conventionnelles de séchage impliquent le départ du liquide par évaporation. Cette opération nécessite un apport thermique important pour amener l'eau à se retirer du produit et pour assurer le transfert de masse. L'apport de chaleur sous pression atmosphérique peut se faire par conduction, par rayonnement ou par convection, ce dernier mode est plus utilisé car il permet un transfert simultané de chaleur et de masse (vapeur issue du produit). Le fluide sécheur utilisé habituellement soit l'air chaud, soit la vapeur d'eau surchauffée. Au contact du produit à sécher, la vapeur qui n'est pas saturée en eau se refroidit en cédant une partie de sa chaleur sensible, évaporant ainsi l'eau contenue dans le produit [11]

#### ❖ Effet du séchage :

##### -Durcissement

Au fur et à mesure que les pâtes perdent de l'eau, leur plasticité diminue et elles deviennent rigides, ce qui permet leur manipulation.

##### -Retrait et perte du poids

L'eau qui s'évapore provoque une perte de masse et une diminution de volume. Il y a deux phases :

-Le retrait est proportionnel à la masse d'eau éliminée : c'est le départ de l'eau libre (colloïdale)

-L'eau continue de s'évaporer sans retrait de la pâte, celle-ci devient poreuse et le volume des pores correspond au volume d'eau éliminé dans cette phase : c'est le départ de l'eau d'interposition ou l'eau liée, Ces différentes phases sont mises en évidence par la « courbe de Bigot ». C'est dans la première phase que peuvent se produire les accidents tels que déformations, fentes, gerces.

Le séchage peut se faire à l'ombre, à l'air libre sous les rayons du soleil ou les deux respectivement à l'échelle industrielle, le séchage peut être effectué par séchoir pour accélérer le processus. [7]

**I.3.4 Frittage**

La dernière étape du procédé céramique consiste à consolider la structure granulaire, obtenue par l'une des voies décrites ci-dessus, par un processus à haute température appelé « frittage ». Au début du frittage les grains constituant l'objet « se soudent » les uns aux autres pour former des ponts assurant une consolidation de la structure granulaire, la poursuite du frittage conduit à sa densification (réduction de la porosité) qui s'accompagne d'une réduction du volume de la pièce. La cuisson est réalisée dans des fours à gaz, dans des fours traditionnels ou dans des fours électriques.

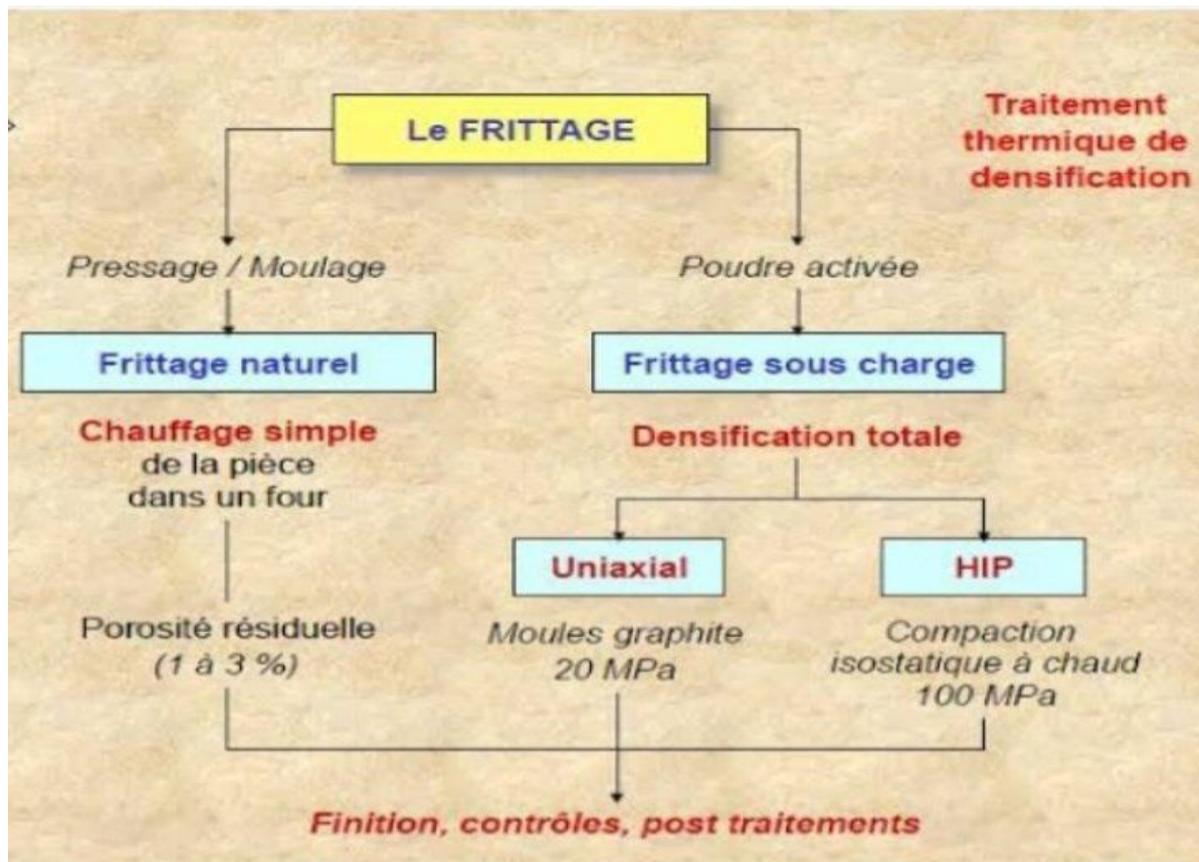


Figure I.11 : Troisième étape de fabrication de céramique [8]

## I.4 Les matières premières des céramiques

### I.4.1 Matières premières plastiques

La matière première de base des céramiques traditionnelles est l'argile. Ce terme est utilisé pour désigner un ensemble constitué de grains de tailles inférieure à 2  $\mu\text{m}$ , riche en phyllosilicates (aluminosilicates hydratés de structure lamellaire) et susceptible de former une suspension colloïdale dans l'eau. Parmi les phyllosilicates présents dans les argiles, on peut distinguer les silicates d'alumine, tels la kaolinite et l'halloysite, des produits contenant dans leur réseau cristallin des alcalins ou des alcalino-terreux, tels les micas (muscovite et illite) et les smectites. Mélangée à une certaine quantité d'eau, la poudre d'argile forme une pâte plastique, malléable et cohésive, semble à celle utilisée par le potier sur son tour. Cette plasticité est due à la forme en plaquette des grains de phyllosilicates et à leur forte affinité pour l'eau liquide. Les céramistes ont l'habitude de classer les argiles en fonction de leur plasticité (aptitude à la mise en forme) et leur comportement à la cuisson. [2]

- ❖ Les argiles rouges sont surtout utilisées pour la fabrication des produits de terre cuite. Leur forte teneur en fer (plusieurs % massiques en équivalent  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) est à l'origine de la couleur brun rouge des tessons après cuisson.
- ❖ Les argiles plastiques grésantes se distinguent par la forte plasticité des pâtes qu'elles forment avec l'eau et l'apparition d'un abondant flux visqueux (phénomène de grésage) durant la cuisson.
- ❖ Les argiles réfractaires sont constituées très majoritairement de kaolinite.
- ❖ Les produits appelés ballclay sont des argiles plastiques présentant un caractère réfractaire marqué. [2]

### I.4.2 Matières premières non plastique

Elles sont également appelées matières dégraissantes, car leur adjonction aux argiles diminue la plasticité de celles-ci, les rendant moins onctueuses au toucher, les principales sont :

: Chapitre I Généralités sur les céramiques [12]

- Les feldspaths : sont des roches dures composées essentiellement de silice, d'alumine et d'alcalins.

- Le quartz : sous forme de sable.
- Le talc : Il donne avec les argiles des cristallisations qui confèrent au tesson une bonne résistance au choc thermique et une dilatation peu élevée. Est un silicate de magnésium hydrate.
  - ♣ Les chamottes : on appelle chamotte dans contexte des céramiques traditionnelles une composition argileuse calcinée.



**Figure I.12 : Feldspath et quartz [12]**

### I.4.3 Matières premières des vernis et couleurs

- Les matières premières principales des vernis sont la silice sous forme de sable très purs, la craie et la chaux.
- Les couleurs céramiques peuvent être réalisées par la mise en œuvre de sorte de vernis colorés par de composantes métallique, ou des pigments colorés recouverts d'un vernis transparent.

### I.5 Domaine d'utilisation de la céramique

Les principaux domaines, qui sont définis par les produits céramiques fabriqués, sont les suivant [13] :

- Les céramiques techniques : Les céramiques techniques s'utilisent dans de nombreuses industries et concernent à la fois les produits établis, comme les isolants, et les nouvelles applications.

- Les carreaux pour sols et murs (carrelages) : Les carreaux céramiques pour sols et murs sont d'importants produits de revêtement pour sols et murs qui sont utilisés dans l'industrie du bâtiment et du logement.
- Les briques et les tuiles : Le plus souvent, les briques et les tuiles ont une appellation qui désigne non pas la technique de façonnage utilisée, mais l'usage auquel elles sont destinées
- Les céramiques ornementales (céramiques domestiques) : La fabrication des céramiques domestiques englobe la vaisselle, les objets artificiels et de fantaisie en porcelaine, en faïence et en grès fin. Les produits types sont les assiettes, les plats, les tasses, les coupes, les carafes et les vases.
- Les produits réfractaires : Les produits réfractaires s'utilisent généralement dans les industries les plus consommatrices d'énergie, comme la métallurgie, l'industrie cimentière, la pétrochimie et l'industrie verrière.
- Les appareils sanitaires : Des produits céramiques types sont les cuvettes pour sanitaires, les lavabos, les citernes et les bornes fontaines. Ces produits sont principalement en porcelaine vitreuse (imitation de porcelaine) ou en faïence.
- Les tuyaux en grès : Les tuyaux et raccords en grès sont utilisés pour les canaux de drainage et les égouts, mais aussi pour les réservoirs à acides et pour les produits destinés aux bâtiments pour animaux.
- Les granulats d'argile expansée : Ils s'utilisent comme matériau meuble pour l'aménagement paysager ou comme matériau lié par ciment dans l'industrie de la construction.
- Les abrasifs inorganiques : Les produits abrasifs qui sont des outils couramment utilisés pour travailler toutes sortes de matières : non seulement pour le broyage, mais aussi pour le tronçonnage, le polissage, le dressage, l'affûtage etc. de métaux, plastiques, bois, verre, pierres.

### I.6 Les caractéristiques des céramiques

Les céramiques sont caractérisées par : [13]

- Une bonne résistance mécanique
- Une faible masse volumique
- Une dureté élevée
- Une bonne résistance à l'usure
- Une bonne résistance aux chocs thermiques

#### I.6.1 Applications

Les céramiques techniques tendent à remplacer les métaux dans un nombre croissant d'applications. Leur faiblesse majeure réside dans leur fragilité, liée à leur raideur, là où les métaux présentent une bonne résistance à la rupture en raison de leur ductilité.

Elles tendent revanche à réduire les contraintes locales accumulées sous l'effet de déformations élastiques et plastiques. Le développement de matériaux composites à fibres de céramiques a permis de réaliser des progrès significatifs en ce domaine et d'élargir sensiblement la gamme des applications des céramiques techniques.

On trouve des céramiques dans des roulements mécaniques et joints d'étanchéité, comme des coques de palies pour les turbines à gaz. Des garnitures mécaniques en céramiques, La plupart des métaux céramiques sont généralement connues comme isolants, comme dans les bougies d'allumage et les isolateurs pour lignes à haute tension. [13]

### I.7 Propriétés des céramiques

Les propriétés des matériaux de construction déterminent le domaine de leur application, ce n'est qu'en évaluant exactement les qualités des matériaux, c'est-à-dire leurs propriétés les plus importantes, que l'on peut construire des édifices et ouvrages solides, durable et de haute efficacité économique et technique, toutes les propriétés des matériaux de construction sont divisées en propriétés physiques, chimiques et mécaniques. [14]

#### I.7.1 Propriétés physiques

Le poids, la densité, perméabilité aux liquides, aux gaz à la chaleur et à l'émanation radioactive, ainsi que la résistance à l'action agressive de l'ambiance. [14]

### I.7.2 Les propriétés chimiques

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

Le pouvoir des matériaux de résister à la compression, à la traction, aux chocs, à l'enfoncement des corps étrangers, ainsi qu'à tout résultant de l'application d'une force. Elles présentent un module d'élasticité très élevé et des déformations élastiques extrêmement restreintes. On peut supposer, avec une très bonne approximation, que leur comportement est élastique jusqu'à la rupture. [15] Comme les masses volumiques céramiques sont faibles, leurs modules spécifiques  $E$  (raideurs spécifiques) très élevés les rendent très attractives.

$E$  céramiques  $>$   $E$  métaux  $>$   $E$  polymères De plus les liaisons ioniques et les liaisons covalentes sont très cohésives : En outre, les céramiques sont constituées d'atomes légers (C, O, Si, Al) et présente une structure cristalline souvent non compacte :  $\rho$  métaux  $<$   $\rho$  céramiques  $<$   $\rho$  polymères La figure I.13 représente les courbes rationnelles typiques de différents matériaux.

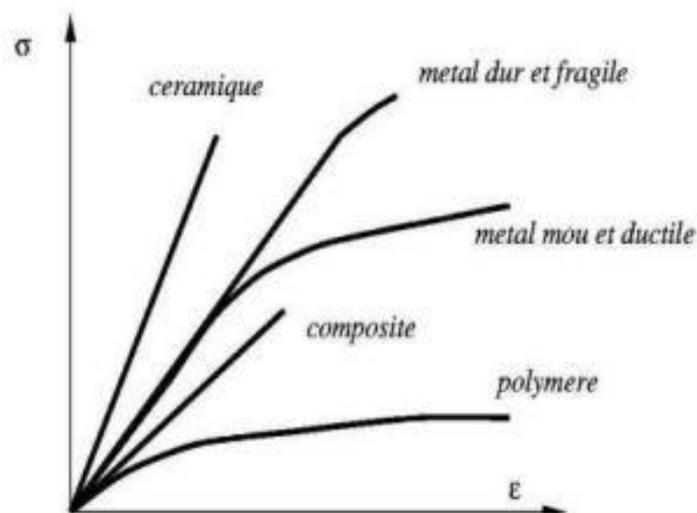


Figure I.13 : Courbes rationnelles typiques de différents matériaux

### I.7.3 Propriétés thermiques

Lorsque les céramiques sont traitées thermiquement, l'argile se transforme, et après refroidissement, elle est alors constituée uniquement d'une phase amorphe ou d'un mélange d'une phase amorphe et de phases cristallisées. Le choix, souvent empirique, des matières premières et du cycle de cuisson dépend des propriétés d'usage recherchées pour les produits finaux : par exemple, une faible conductivité thermique, une forte résistance mécanique ou même certains aspects esthétiques (couleur). La cuisson des produits céramiques dans un four industriel est longue et nécessite plusieurs étapes. Cependant, depuis les années 70, il est question de réduction du temps de cuisson, non seulement pour des raisons de rentabilité (diminution du stockage, économie de personnel...), mais aussi pour diminuer la quantité d'énergie utilisée. Pour cela il est important de connaître les transformations structurales et microstructurales des matières premières lors d'un traitement thermique, car elles induisent une évolution de leurs propriétés thermo physiques. Or, la capacité calorifique détermine le besoin énergétique d'un procédé de cuisson. En outre, la distribution de température dans une pièce en régime permanent est contrôlée par la conductivité thermique et, en régime transitoire, par la diffusivité thermique. [16]

### I.7.4 Propriétés mécaniques

Tous les matériaux interagissent avec des agents extérieurs lorsqu'ils sont utilisés.

Les Propriétés mécaniques concernent la déformation d'un matériau soumis à une force. On ne peut pas calculer ni déterminer les charges admissibles sans connaître les caractéristiques mécaniques du matériau à utiliser.

Les propriétés mécaniques courantes des métaux sont liées aux concepts usuels d'élasticité et de plasticité. Elles résultent des différentes orientations des cristaux et de la présence des joints. Les propriétés mécaniques dépendent de la température d'utilisation, de l'état de surface, des conditions d'application des efforts, de la vitesse de déformation. Elles sont déterminées, avec un certain intervalle de précision, au moyen d'essais normalisés. Pour assurer une bonne résistance du produit fini, il faut :

- ♣ Une bonne connaissance des propriétés et des caractéristiques mécaniques des matériaux.
- ♣ Une identification des sollicitations (force, déformation...) auxquelles sont soumises les pièces.

- ♣ Un dimensionnement (sections) optimal des pièces en fonction de la nature et des propriétés des efforts.

Pour prédire le comportement en service d'un matériau, on doit connaître des caractéristiques aussi bien à l'échelle microscopique qu'à l'échelle macroscopique. [17]

Les principales sont [12] :

- La résistance : caractérise la contrainte maximale que peut supporter un matériau avant de se rompre
- La dureté : résistance d'un matériau à la pénétration
- La ductilité : capacité du matériau à se déformer de manière irréversible avant de rompre
- La rigidité : fonction de l'intensité des liaisons entre atomes ou molécules

### I.8 Les essais mécanique

#### I.8.1 L'essai de dureté :

La dureté peut être définie comme une mesure de la résistance à la déformation plastique localisée. Les méthodes de mesure de la dureté sont basées sur la pénétration forcée d'un indenteur à la surface d'un matériau. Une valeur de dureté est déterminée par la mesure de la dimension ou de la profondeur de l'empreinte faite par l'indenteur soumis à des charges et des vitesses d'application contrôlées.

Les tests de dureté ont été réalisés au moyen d'un duromètre universel à indenteur Brinell, Rockwell et Vickers. [4]



Figure I.14 : Duromètre universel [17]

### I.8.1.1 Essai BRINELL

Johan August BRINELL (1849–1925), ingénieur métallurgiste suédois, travaillait sur la transformation des aciers en fonction de la température. Il avait besoin d'un test rapide non destructif pour déterminer la dureté des différents aciers testés. Il met au point son test de dureté BRINELL basé sur un indenteur bille, pour alliages métalliques peu durs.

L'essai consiste à imprimer dans la pièce une bille en acier ou en carbure de tungstène de diamètre «  $D$  » sous une charge «  $F$  » et à mesurer le diamètre «  $d$  » de l'empreinte. La force  $F$  étant exprimée en kgf, le diamètre de l'empreinte  $d$  en mm et la dureté Brinell  $HB$  est exprimée en kgf/mm<sup>2</sup> selon la relation suivante [17,4] :

$$HB = \frac{2F}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})} \quad (I.1)$$

Avec :  $d = \frac{d_1 + d_2}{2} \quad (I.2)$

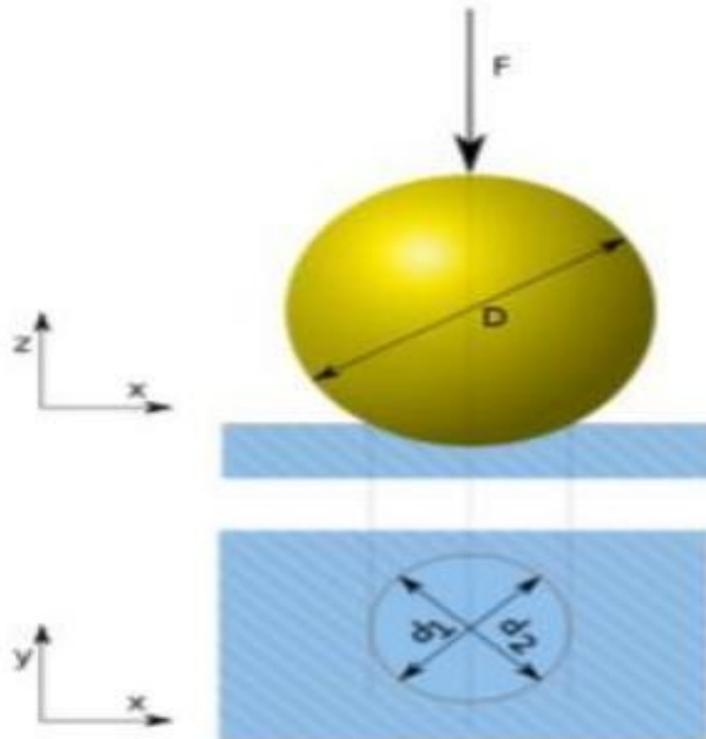


Figure I.15 : Essai de brinell [17]

### I.8.1.2 L'essai VICKERS

SMITH et SANDLAND, ingénieurs chez VICKERS Ltd GB ont besoin de tester des matériaux trop durs pour le test BRINELL. En 1925, ils conçoivent une pyramide diamant. Cette pyramide de diamant à base carrée a un angle au sommet de  $136^\circ$ . Après l'indentation, on mesure la moyenne des diagonales  $d_1$  et  $d_2$  de l'empreinte en microscopie optique. L'essai VICKERS est adapté pour les alliages durs et les céramiques. La force  $F$  étant exprimée en kgf, le diamètre de l'empreinte  $d$  en mm et la dureté Vickers est exprimé en  $kgf\ mm^2$  / selon la relation suivante [4] :

$$H_v = \frac{1.8454F}{d^2} \quad (I.3)$$

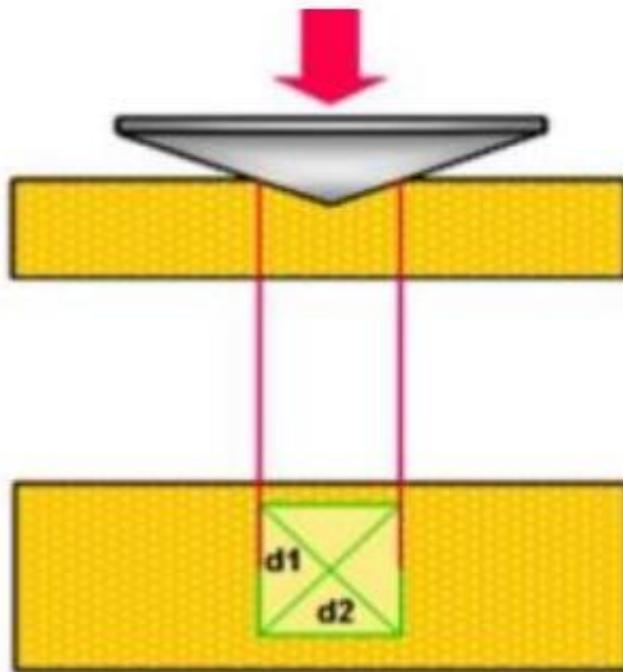


Figure I.16 : Principe de l'essai de dureté VICKERS [4]

### I.8.1.3 L'essai ROCKWELL

Stanley ROCKWELL travaille comme métallurgiste dans une usine de roulements à billes. Il vérifie les traitements thermiques par des tests de dureté. L'essai BRINNEL donne une indentation trop grosse. L'essai VICKERS est trop long. En 1922, ROCKWELL conçoit un nouveau système avec différents pénétrateurs, adapté aux métaux et aux plastiques avec une large gamme de matériaux testés. [4]

Le Pénétrateur :

- soit bille en acier de diamètre 1,59 mm = Rockwell b pour les matériaux mous comme les alliages de cuivre
- soit cône en diamant d'angle au sommet  $120^\circ$  et dont l'extrémité est une calotte sphérique de rayon 0,1mm = Rockwell c, pour les matériaux plus durs comme l'acier.

Précharge  $F_0$  faible de 10 daN = niveau de référence

Surcharge  $F_1$  de 60 à 150 daN

Charge  $F_2 = F_0$  à nouveau de 10 daN

On mesure la profondeur de l'empreinte = différence des 2 positions ( $F_2 - F_1$ )

Avec :  $F_0$  : précharge appliqué

$F_1$  : surcharge appliqué

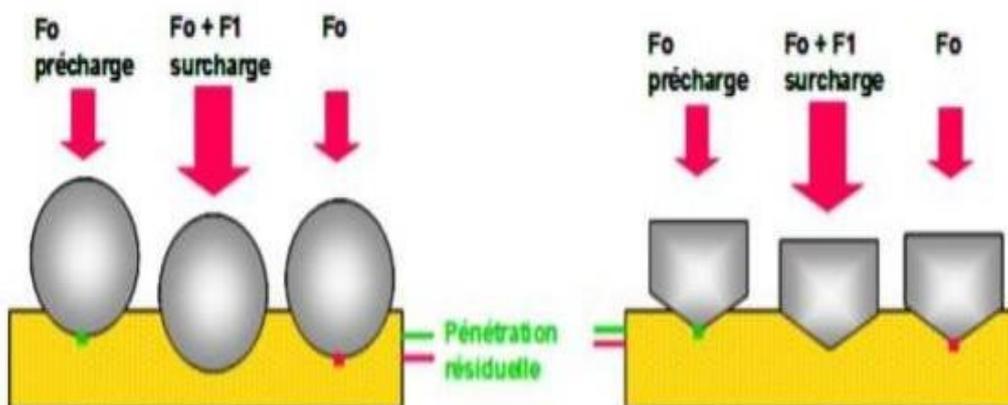


Figure I.17 : Principe de l'essai de dureté ROCKWELL b et ROCKWELL c [4]

En fonction du type d'indenteur et de la valeur de la charge appliquée on détermine différents types de duretés ROCKWELL (échelle de A à H, de K à M, P, R, S, V) adaptées aux différents types de matériaux. [4]

## I.8.2 L'essai de rugosité

### I.8.2.1 Définition de la rugosité

C'est l'ensemble des irrégularités d'une surface à caractère micrographique et macrographique.

Les surfaces usinées ne sont pas parfaites, elles présentent des irrégularités dues aux procédés d'usinage, aux outils, à la matière, etc. Le rôle fonctionnel d'une surface dépend d'un certain nombre de facteurs, notamment de l'état de surface (étanchéité, glissement, etc.).

Plus l'indice de rugosité est faible, plus il est difficile à obtenir, ce qui augmente nécessairement le coût de fabrication. [18]

### I.8.2.2 Principaux critères de rugosité

Considérons une coupe locale de la surface usinée perpendiculairement aux sillons d'usinage soit OX la ligne moyenne tel que :

$$\int_0^1 y dx = 0 \quad (I.4)$$

Les principaux critères de rugosité sont définis par rapport à cette ligne moyenne. [19]

#### a) Rugosité totale $R_t$

$R_t$  représente l'écart total entre le point le plus haut et le point plus bas du profil.

#### b) Rugosité $R_z$

$R_z$  représente la distance moyenne entre les cinq sommets les plus élevés et les cinq creux les plus bas.

#### c) Rugosité $R_a$

$R_a$  représente la moyenne arithmétique des écarts (en valeur absolue) par rapport à OX.

$R_a$  est calculé sur une longueur d'évaluation :

$$R_a = \frac{1}{L} \int_0^L |y| dx \quad (I.5)$$

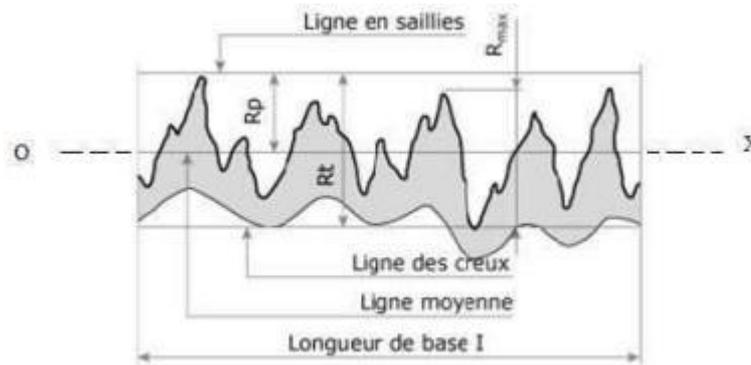


Figure I.18 : Rugosité arithmétique [19]

**d) Rugosité maximum R max**

C'est le maximum de la hauteur des irrégularités de profil de rugosité R max étant pris sur une saillie et un creux consécutif.

**e) Rugosité Rp**

C'est la hauteur maximale de saillie de rugosité. Rp est la distance entre la ligne des saillies et la ligne moyenne pour une longueur (L).

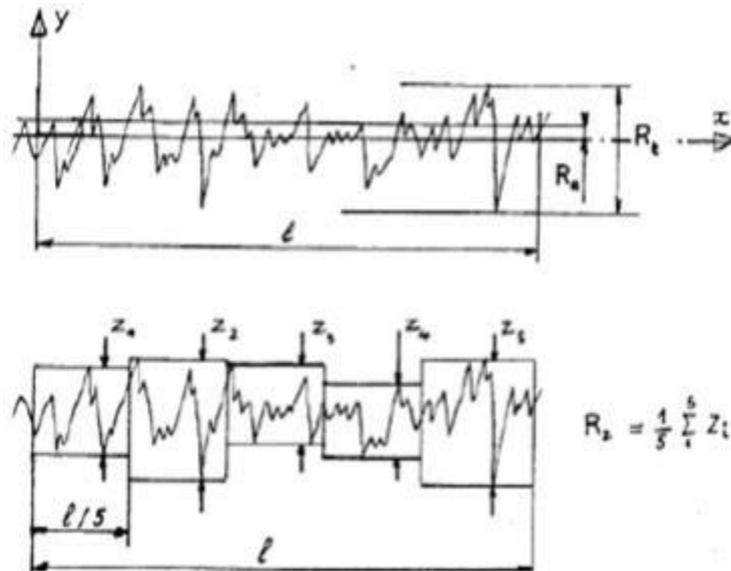


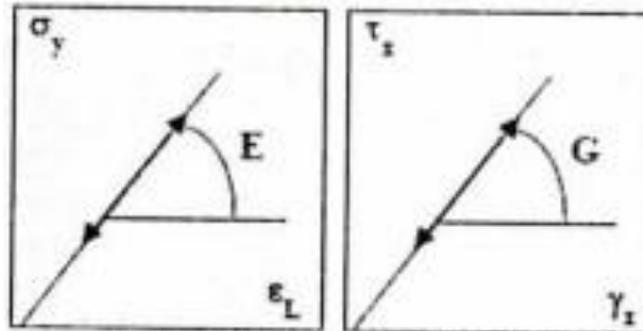
Figure I.19 : Principaux critères de rugosité [19]

## I.9 Module de Young et coefficient de poisson

### I.9.1 Module de Young

Le module d'Young est le facteur de proportionnalité entre la contrainte  $\sigma_y$  et la déformation  $\epsilon_y$  :

$$E = \sigma / c \quad (I.6)$$



**Figure I.20 : Courbes contraintes déformations**

Les céramiques comme les métaux, possèdent des modules de Young bien définis : leurs valeurs ne dépendent pas de la durée de vie de la charge (ou de la fréquence si le chargement est cyclique). Les modules de Young des céramiques sont en général supérieurs à ceux des métaux, ce qui reflète la grande raideur des liaisons ioniques dans les oxydes et des liaisons covalentes. [20]

### I.9.2 Coefficient de poisson

Les coefficients de poisson des céramiques sont en général inférieurs à ceux des métaux, selon les matériaux, sa valeur varie de 0 (0,05 pour le béryllium) à 0,5 (caoutchouc), cette limite haute caractérisant des matériaux dont la déformation élastique s'effectue à volume constant. [20]

$$\nu = \frac{\epsilon_r}{\epsilon} \quad (I.7)$$

## Conclusion

Dans ce chapitre on a défini les céramiques, les structure des céramiques, les céramiques (traditionnelles et techniques), les propriétés mécanique et physique et enfin sur les propriétés mécaniques (la dureté Vickers, la rugosité de surface) des composites céramiques.



# **Chapitre II**

## **Généralités sur l'usinage par fraisage**

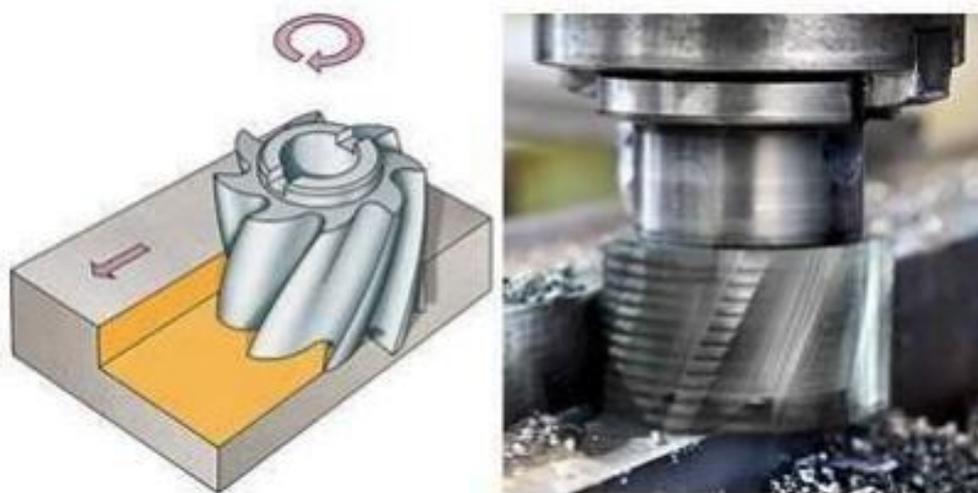
### Introduction

Il existe plusieurs procédés de fabrication des pièces mécaniques, notamment, les procédés de fabrication par déformation et les procédés de fabrication par enlèvement de matière. L'usinage par enlèvement de matière est un procédé de fabrication de pièces mécaniques. Usinage enlèvement de la matière de façon à donner à la pièce brute la forme et les dimensions voulues, à l'aide d'une machine-outil. Par cette technique, on obtient des pièces d'une grande précision. [21]

Dans ce chapitre, nous présenterons des généralités sur le procédé de fraisage, les machines et les processus appliqués au fraisage.

### II.1 Le Fraisage

Le fraisage est, dans son principe, un procédé de fabrications mécanique par enlèvement de matière, en coordination, le mouvement de rotation d'un outil à plusieurs arêtes et l'avance rectiligne d'une pièce, toutefois, on a également un déplacement de l'outil par rapport à la pièce, lequel peut s'effectuer pratiquement dans n'importe quelle direction. Les avantages du fraisage sont un rendement élevé, une bonne finition de surface et une haute précision, ainsi qu'une grande souplesse au niveau de la génération de différentes formes. Le plus souvent, le fraisage est utilisé pour produire des surfaces planes, des épaulements et des gorges, mais son efficacité en contournage va croissante grâce à l'utilisation des techniques CNC. [22]



**Figure II.1 : Enlèvement de matière par le fraisage**

### II.2 Classification des fraiseuses

#### II.2.1 Fraiseuse universelle

La machine de base est une fraiseuse à axe horizontal dont la table est orientable ; les mouvements d'avance sont donnés à la table ; l'arbre porte-fraise est animé du mouvement de rotation uniquement.

La machine est conçue de telle manière qu'elle peut recevoir une tête universelle et des équipements spéciaux tels que : appareils diviseurs, tables circulaires, appareil à mortaiser, etc. Elle permet en principe l'exécution de toutes les opérations courantes : son universalité est due surtout à la possibilité de la convertir en fraiseuse horizontale ou verticale et de pouvoir assurer l'entraînement des appareils diviseurs. [24]



Figure II.2 : Fraiseuse universelle [23]

#### II.2.2 Fraiseuse verticale

Ce qui différencie le plus cette dernière de la précédente, c'est que la tête verticale possède un déplacement axial de broche ; la table n'est pas orientable ; elle n'est pas conçue pour recevoir des organes de conversion ; la tête ne peut être démontée mais elle est orientable

dans un plan. Elle est surtout employée pour exécuter des surfacages, rainures et épaulements avec des capacités de coupe bien supérieures, comparée à une machine tête universelle. En outre, le déplacement axial du fourreau de broche permet la réalisation successive d'épaulements ou des surfacages à des niveaux étagés sur une même pièce en épargnant le mécanisme du mouvement vertical de la console qui reste bloqué pendant toute la durée des opérations. [24]



**Figure II.3 : Fraiseuse vertical [24]**

### II.2.3 Fraiseuse horizontale

Trois mouvements d'avance de la table porte-pièce ; la table n'est pas orientable. La machine est rarement commercialisée sous cette forme. Les constructeurs prévoient dans la plupart des cas la possibilité d'y adapter des accessoires - tête universelle - tête verticale. Elle est souvent cataloguée comme fraiseuse universelle. [24]



**Figure II.4 : Fraiseuse horizontale [24]**

#### **II.2.4 Fraisage à commande numérique par ordinateur**

Sur ces machines le contrôle de l'ensemble des mouvements nécessaires au positionnement est assuré automatiquement en vitesse et en position par le directeur de commande numérique (DCN) suivant les instructions données par l'opérateur ou le programmeur. [25]



**Figure II.5 : Fraisage à commande numérique [26]**

### II.3 Procédés de fraisage

#### II.3.1 Fraisage en bout

L'axe de la fraise est placé perpendiculairement à la surface à usiner (figII.6). La fraise coupe avec son diamètre, mais aussi avec sa partie frontale. Les coupeaux sont de même épaisseur, ainsi la charge de la machine est plus régulière. La capacité de coupe est supérieure à celle réalisé par le fraisage en roulant. La qualité de l'état de surface est meilleure. [27]

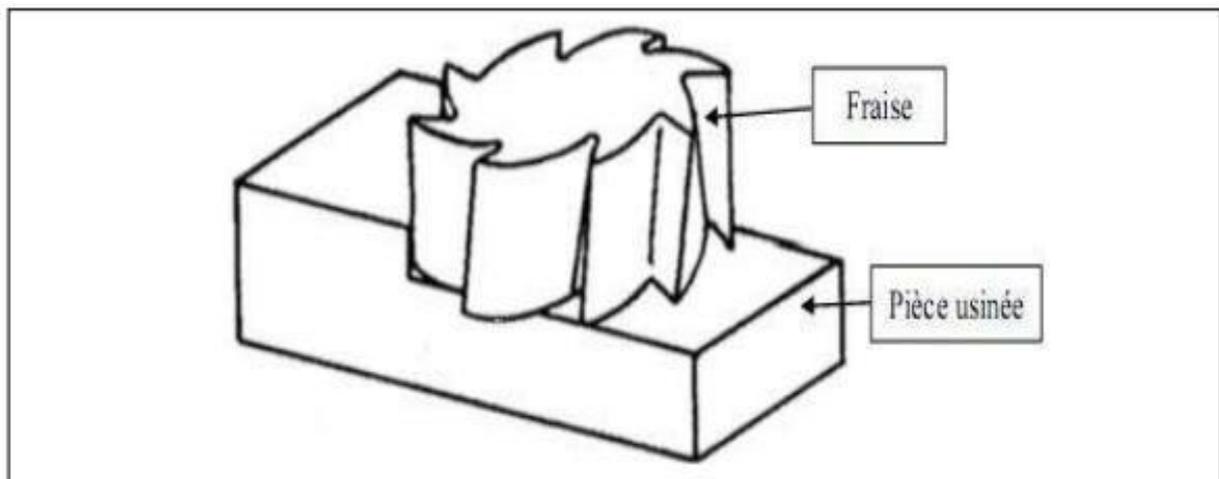


Figure II.6 : Fraisage en bout [27]

#### II.3.2 Fraisage en roulant

Pour ce type de fraisage en roulant, l'axe de la fraise est placé parallèlement à la surface à usiner. La fraise coupe avec son diamètre (figII.7). La charge de la machine en est irrégulière, surtout lors de l'emploi de fraises à denture droite. Les à-coups provoqués par cette force de faire donnent une surface ondulée et striée. Pour pallier ces défauts, en utilisera une fraise à denture hélicoïdale. L'amélioration enregistrée s'explique ainsi : la denture est chargée/déchargée progressivement. [27]

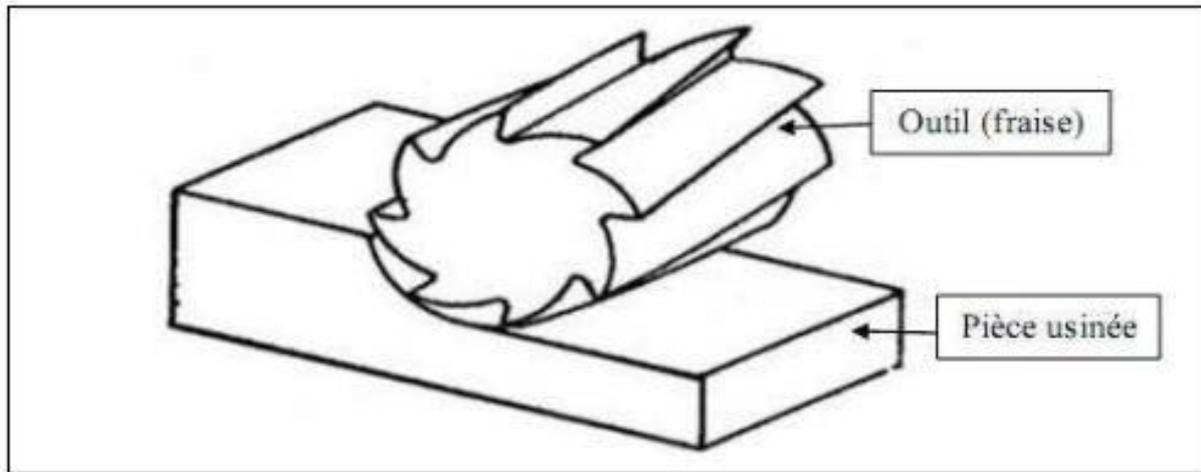


Figure II.7 : Fraisage en roulant [27]

### II.3.3 Fraisage combiné

Pour le fraisage combiné, la fraise coupe avec son diamètre et sa partie frontal (figII.8). [27]

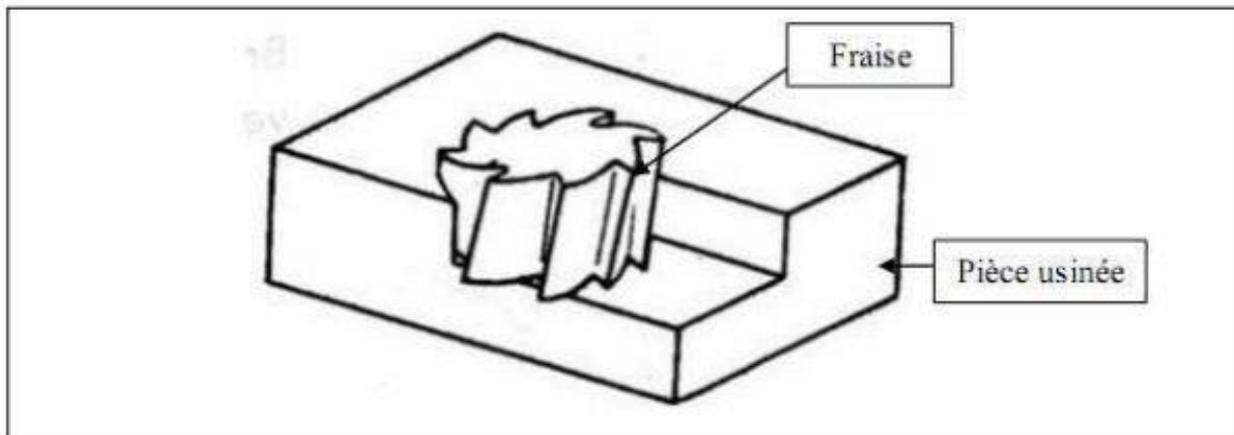


Figure II.8 : Fraisage combiné [27]

### II.4 Les différents types d'opérations en fraisage

Les formats suivants illustrent les différentes opérations pouvant être effectuées sur les machines de fraiseuses.

### II.4.1 Surfaçage

Le surfaçage c'est l'usinage d'un plan par une fraise (surface rouge). [28]



Figure II.9 : Le surfaçage [28]

### II.4.2 Plans épaulés

C'est l'association de 2 plans perpendiculaires (surfaces vertes). [28]



Figure II.10 : L'épaulement [28]

### II.4.3 Rainurage

C'est l'association de 3 plans. Le fond est perpendiculaire au deux autres plans (surfaces vertes). [28]

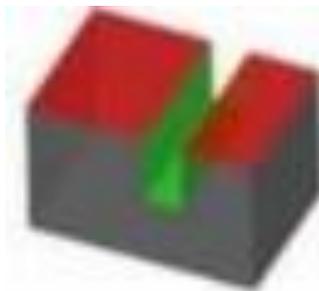


Figure II.11 : Le rainurage [28]

**II.5 Les différents types d'outils**

Les outils permettent d'enlever le copeau. La géométrie de l'outil influe directement sur les formes usinables sur la pièce. Ceci vous sera présenté plus loin. Tout d'abord, on va s'attarder sur les outils eux-mêmes.

**II.5.1 Outils ARS (acier rapide supérieur)**

Les outils en ARS sont constitués le plus souvent d'un barreau monobloc en acier rapide supérieur, l'arête de coupe est affûtée. Si l'outil est usé, il suffit de réaffûter l'arête de coupe. Dans l'atelier, les outils suivant sont en ARS : les forets, et fraises 2 tailles. [28]



**Figure II.12 : Les outils de fraisage en ARS [29]**

**II.5.2 Outils carbure**

Pour améliorer les performances des outils, l'arête de coupe est placée sur une plaquette amovible en carbure. Ce matériau est très résistant par rapport à ARS. La plaquette carbure est obtenue en compressant différentes poudres de carbure. Dès que l'arête de coupe est usée, il suffit de changer la plaquette.

Dans l'atelier, les outils suivant sont à plaquettes carbures : fraise à surfacer Ø63, fraise 2 tailles Ø16, outil de tournage d'ébauche et de finition. [28]

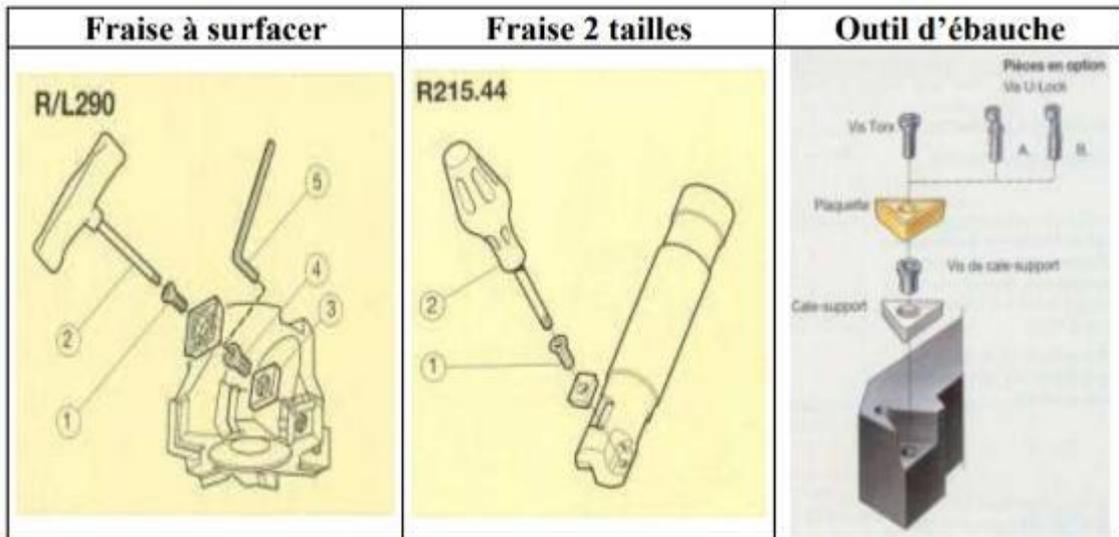


Figure II.13 : Outils carbure

II.5.3 Outils de perçage

Cette opération définit l'obtention d'un trou quelconques dans une pièce. On y associe des outils de perçage : forets. [28]

Foret à centrer	Foret à pointer	Foret	Alésoir	Fraise à lamer
				
A utiliser pour situer l'axe d'une pièce en tournage	A utiliser pour positionner un perçage	Pour percer des trous (tolérance H10)	Pour la finition d'un trou de bonne qualité (tolérance H7)	Pour noyer une tête de vis Che

Figure II.14 : Outils de perçage

## II.6 Les paramètres de coupe

### II.6.1 La vitesse de rotation de la broche

C'est le nombre de tours que l'outil de fraisage monté sur la broche de la machine-outil effectue par minute ( $N$  en tr/min). Il s'agit là d'une valeur dépendant de la machine, qui ne renseigne guère sur ce qui se passe à la périphérie où l'arête de coupe fait son office.

$$N = \frac{V_c \times 1000}{\pi D} \quad (\text{II.1})$$

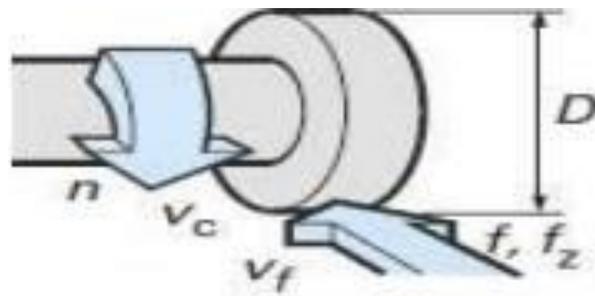


Figure II.15 : La vitesse de rotation de la broche [22]

### II.6.2 La vitesse de coupe

Indique pour sa part la vitesse à laquelle l'arête de coupe travaille la surface de la pièce ( $V_c$  en m/min). C'est un important paramètre de l'outil, qui fait partie intégrante des conditions de coupe avec, pour fonction de garantir que l'opération est effectuée dans les meilleures conditions d'efficacité par l'outil concerné.

$$V_c = \frac{\pi D n}{1000} \quad (\text{II.2})$$

$V_c$  : vitesse de coupe en (m/min).

$D$  : diamètre de l'outil de fraisage (mm).

$N$  : vitesse de rotation de la broche (tr/min)

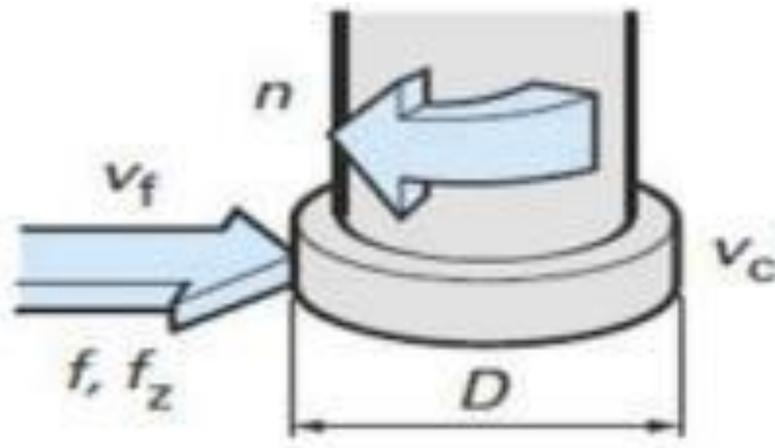


Figure II.16 : La vitesse de coupe [22]

### II.6.3 L'avance

Ou vitesse d'avance ( $V_f$  en mm/min) est l'avance de l'outil en direction de la pièce, exprimée en unités de distance par unité de temps. On parle également ici d'avance de table.

### II.6.4 L'avance par tour

Est une valeur spéciale spécialement utilisée pour calculer l'avance et déterminer l'aptitude d'une fraise à surfaçer à travailler en finition. Elle indique de combine l'outil avance au cours d'une rotation ( $f$  en mm/tr).

$$f = \frac{V_f}{n} \quad (\text{II.3})$$

### II.6.5 L'avance par dent

C'est un important paramètre en fraisage. La fraise étant un outil à arêtes multiples, il faut en effet disposer d'un moyen de mesure pour contrôler que chacune de ces arêtes travaille dans des conditions satisfaisantes. La capacité d'enlèvement de matière de chaque dent est l'élément limitatif au niveau des performances de l'outil. L'avance par dent indique la distance linéaire parcourue par l'outil alors qu'une certaine dent est engagée  $f_z$  en (mm/dent).

$$f_z = \frac{V_f}{n \times z} \quad (\text{II.4})$$

### II.6.6 La profondeur de passe

La profondeur de passe axiale ( $a_p$ ) en surfaçage ou radiale ( $a_e$ ) pour le fraisage d'épaulements, correspond à l'épaisseur de matière enlevée par l'outil. C'est la distance à laquelle l'outil est réglé au-dessous de la surface initiale de la pièce.

### II.6.7 Le volume de matière enlevée par unité de temps

( $Q$ ) peut être déterminé en utilisant certaines de ces définitions. Le volume correspond à la profondeur de coupe multipliée par la largeur de coupe, multipliées par la distance dont l'outil se déplace au cours de l'unité de temps concernée. Le volume d'enlèvement de matière est exprimé en millimètres cubes par minute. [22]

$$Q = a_e \times a_p \times Vf \quad (\text{II.5})$$

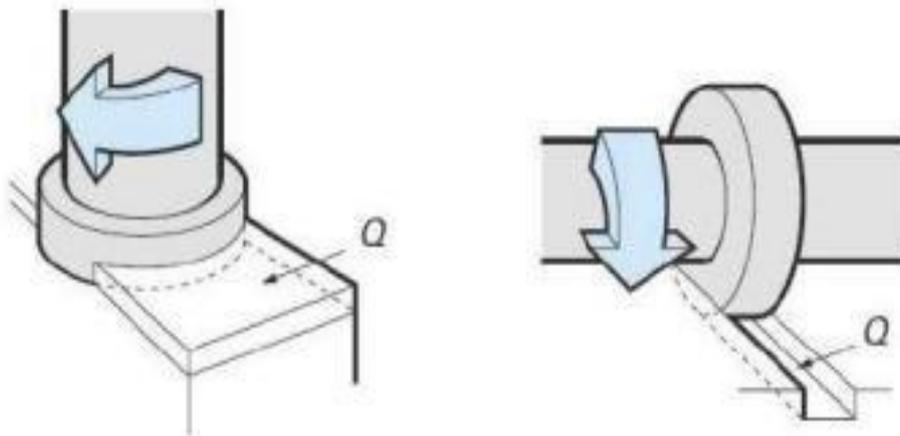


Figure II.17 : Le volume de matière enlevée par unité de temps [22]

### II.7 Polissage

Le taux d'enlèvement de matière dans le procédé de polissage est très petit, les abrasifs n'agissent que sur la couche supérieure de la surface de la pièce, parce que des grains abrasifs très fins et des polissoirs souples sont adoptés.

Le polissage est un procédé de traitement important dans la fabrication des dispositifs suivants :

- Dispositifs optiques passifs : lentilles et prismes de différentes tailles, polariseur etc.
- Dispositifs optiques actifs : barreau de cristal laser, déflecteur optique et modulateur électro-optique Dispositifs piézoélectriques : oscillateur à quartz et filtre
- Dispositifs à semi-conducteurs : les dispositifs magnétiques comme tête de mémoire magnétique.
- Dispositifs mécaniques : plaque en céramique, etc.

Une surface miroir de haute qualité est requise dans le polissage, pour cela il est important de garder la zone de polissage dans un environnement propre et de la séparer complètement de la zone de rodage. En ce qui concerne la suspension de polissage, une attention particulière doit être accordée à l'adoption d'abrasifs fins afin d'éviter la contamination par de grandes particules et de la poussière. [30]

### Conclusion

Dans ce chapitre on a parlé du phénomène de fraisage en général et de son importance, et des méthodes utilisées dans l'industrie mécanique.

Nous avons également parlé des paramètres de coupe et des outils de coupe et sont différente matière utilisés dans le processus d'usinage, qui ont un impact direct sur la rugosité de la surface de coupe.

# **Chapitre III**

## **Partie expérimentale**

**Introduction**

Dans ce chapitre le matériau utiliser est un composite de céramique et polyamine (céramique technique), pour but de la détermination des propriétés mécaniques (la dureté et la rugosité)

**III Objectif de travail**

Le matériau composite utilisé représente une contribution aux propriétés mécaniques spécifiée par la dureté vickers et la rugosité de surface tout en variant le rayon de contact de l'indenteur vickers du centre de la pièce vers l'extrémité et la confirmation des résultats obtenues par l'état de surface dans ces deux zones.

**III.1 Matériaux et machine utilisé****III.1.1 Le matériau utilisé**

Dans ce chapitre le matériau utiliser est l'alliage de céramique et polyamine (céramique technique), avec des dimensions de 40mm de largeur 40mm de longueur et de 15mm d'épaisseur.



**Figure III.1 : Composite de céramique et polyamine**

**III.1.2 Opération d'usinage utilisé****III.1.2.1 Le surfacage**

On a réalisé le surfacage de notre échantillon (composite de céramique) par enlèvement de matière de 2mm dans une fraiseuse horizontale situé au hall technologie de l'université de Bejaia.



**Figure III.2 : Le surfacage**

**III.1.2.2 Machine utilisé**

Le fraisage est réalisé sur une fraiseuse horizontale de modèle : FH 1.6 situé au niveau de hall technologie de l'université de Bejaia (figure III.3). Elle est d'une puissance 4KW, vitesse de rotation de la broche 2000 tr/mn, l'avance 16 mm/mn.



**Figure III.3 : Fraiseuse horizontale modèle FH 1.6**

### III.1.2.3 Outil utilisé

L'outil de coupe utilisé pendant ces essais (fraise à surfacer) est un outil utilisé pour les usinages en fraisage de différentes pièces de type monobloc comme illustré dans la figure III.4



**Figure III.4 : Fraise à surfacer**

### III.1.2.4 Le polissage

Dans notre cas le polissage est obtenu manuellement, il vise à rendre les surfaces lisses et polies, comme un miroir, pour faciliter la réflexion des faisceaux. Il consiste à abraser la surface sous une charge constante, à l'aide des papiers abrasifs revêtus carbure de silicium

(S1C) à indice de granulation progressif 120, 400, 600, 800, 1200, 1400, 1600, 2000, jusqu'au 2400 (papier de finition). Ces papiers sont montés sur des tourets de polissage dont la vitesse 300 tr/min, équipés d'un système d'arrosage à l'eau courante, pour éviter l'échauffement des échantillons.



**Figure III.5 : Le polissage de l'échantillon**

## **III.2 Les essais appliqués**

Pour l'étude de notre céramique, on a appliqués plusieurs essais, et ce sont les suivant :

### **III.2.1 Essai de dureté**

Les tests de dureté sont réalisés au moyen d'un duromètre universel disponible au niveau de hall de technologie de l'université Bejaia.

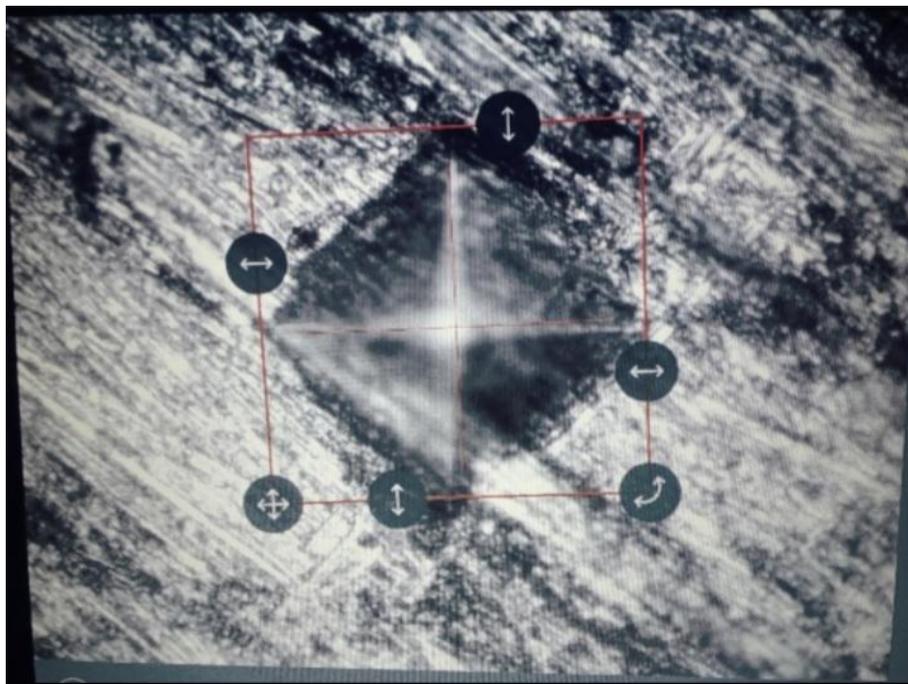
#### **III.2.1.1 Procédure de l'essai**

On a réalisé les essais par un d'uromètre sur des surfaces lisses de l'échantillon en céramique, avec une charge de 0.5 N, après 30 seconds d'application de la charge, on a lu la valeur de dureté de notre matériau. On a répété l'opération pendant des essais à la proximité de centre et d'extrémité de l'échantillon. Ensuite, on a examiné une photographie de l'empreinte de la bille par un microscope optique.



**Figure III.6 : Le duromètre d'université de Bejaia, Qness 250 CS**

On a détecté l'empreinte avec un microscope optique disponible au niveau du hall technologie.



**Figure III.7 : L'empreinte de pénétration**

### III.2.2 Mesure de rugosité

Les tests de rugosité sont réalisés au moyen d'un rugosimètre universel disponible au niveau de hall de technologie de l'université Bejaia.

#### III.2.2.1 Procédure de l'essai

Pour les mesures de rugosité nous avons utilisé un rugosimètre LITEsurf SOMECO assisté par un ordinateur.

On a réalisé les essais par un rugosimètre sur des surfaces planes de l'échantillon en céramique, on a lu la valeur de rugosité de notre matériau. On a répété l'opération pendant des essais à la proximité de centre et d'extrémité de l'échantillon.

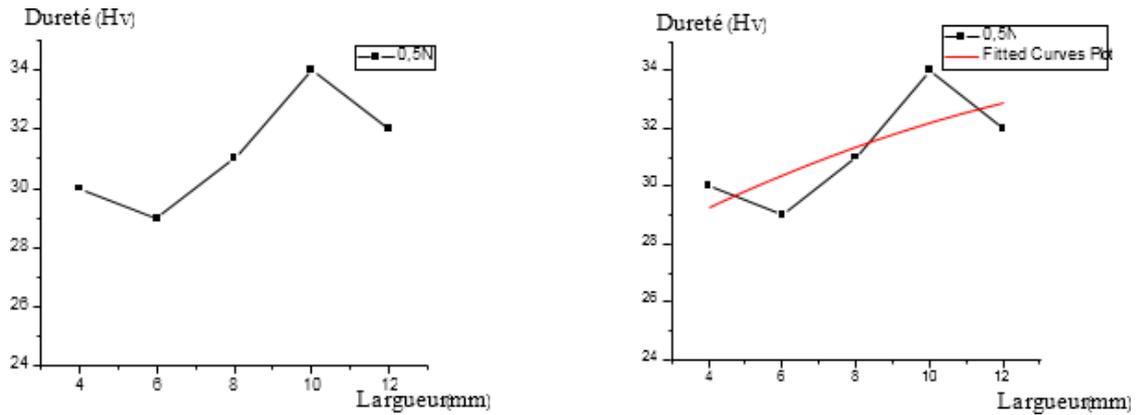


Figure III.8 : Le rugosimètre d'université de Bejaia, LITESURF SOMECO

## III.3 Résultats et interprétations

### III.3.1 Test de dureté Vickers

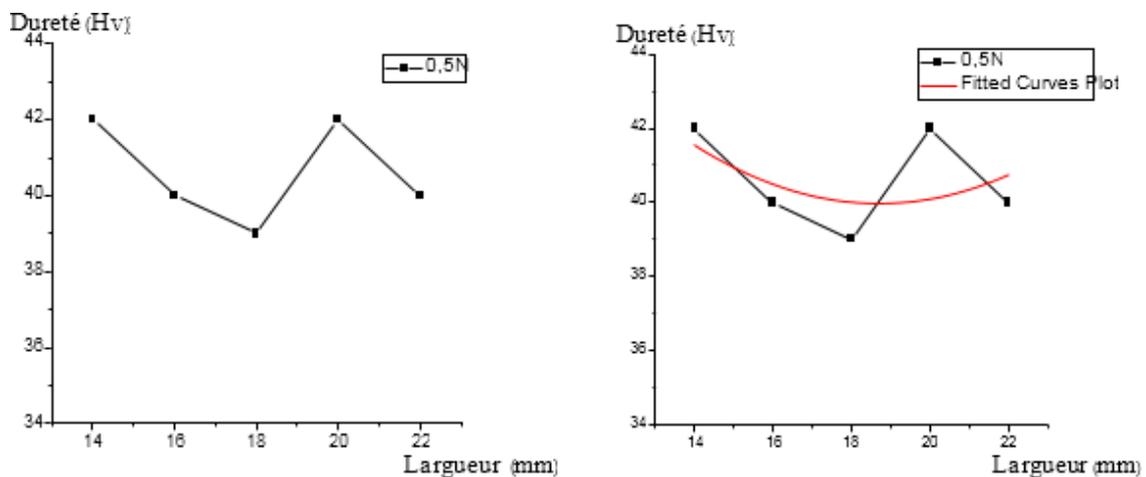
Le test de dureté vickers sur l'échantillon composite de matrice en polyamine et un renfort en céramique a donné les résultats à proximité du rayon de contact de l'indenteur avec le centre et proche de l'extrémité de la pièce a donnés les résultats suivants :



**Figure III.9 : Dureté à proximité du centre de la pièce**

On constate que la dureté à proximité du rayon de contact (centre de la pièce) tend vers une augmentation lente en intensité tout en s'éloignant du centre comme le montre la Figure III.9 et celle de la courbe de tendance.

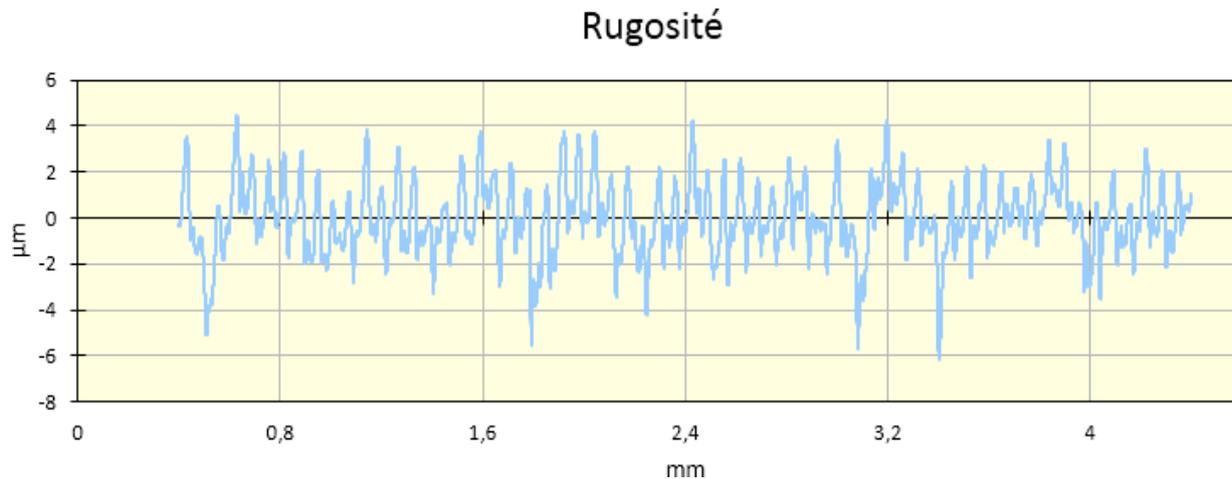
Par contre à proximité de l'extrémité de la pièce, la dureté a augmenté en valeur et tend vers une stabilisation comme le montre la Figure III.10 de la courbe de tendance.



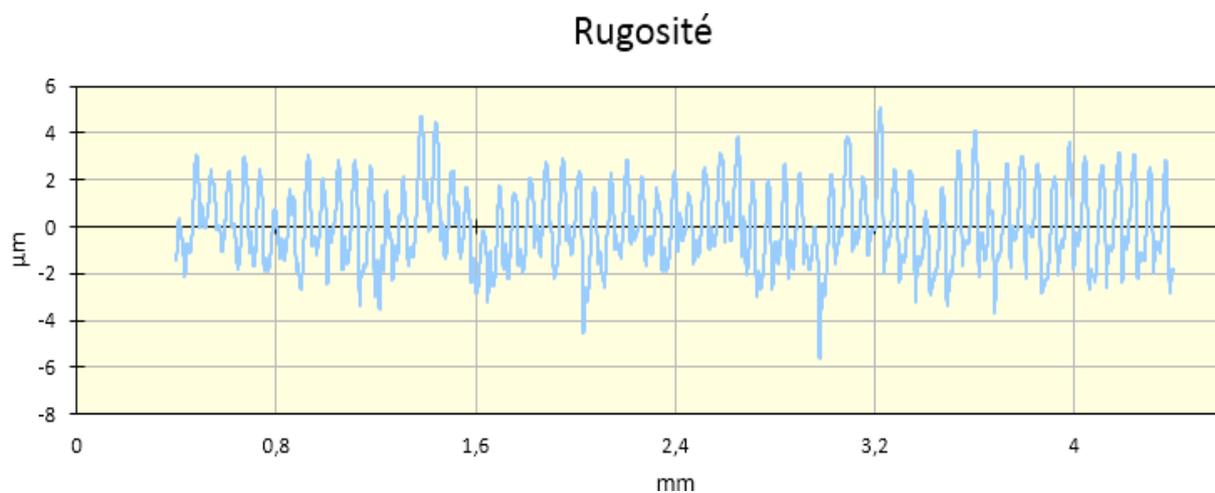
**Figure III.10 : Dureté à proximité de l'extrémité de la pièce**

### III.3.2 Test de rugosité

L'état de surface de la pièce en renfort de céramique et à matrice de polyamine à proximité du centre a fournis une rugosité moyenne  $R_a = 1,241\mu\text{m}$  Figure (III.11) tandis qu'à proximité de l'extrémité de la pièce la rugosité arithmétique s'est manifesté par une valeur un peu plus grande définie par  $R_a = 1,361\mu\text{m}$  Figure (III.12) cela se traduit par une surface sévère à usiner vers l'extérieur et un peu plus facile à usiner vers l'intérieur ou au voisinage du centre.



**Figure III.11 : Rugosité arithmétique moyenne  $R_a$  de surface au voisinage du centre de la pièce**

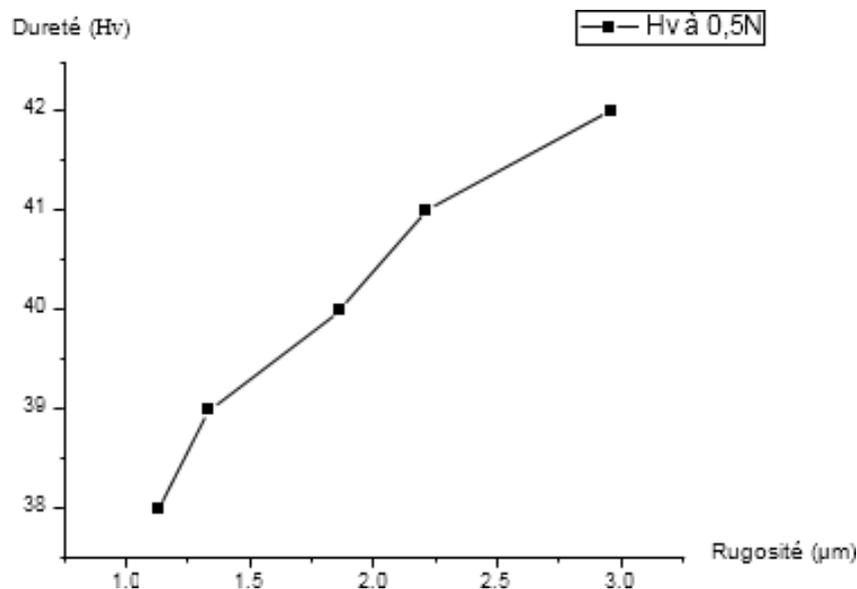


**Figure III.12 : Rugosité arithmétique moyenne de surface au voisinage de l'extrémité de la pièce**

D'après les résultats obtenus l'échantillon composite à montrer que la concentration de la céramique influe beaucoup plus sur la dureté mais la caractéristique constaté pour la matrice polyamine est que elle agit sur les rugosités de surfaces lors de l'usinage par fraisage beaucoup plus une réduction.

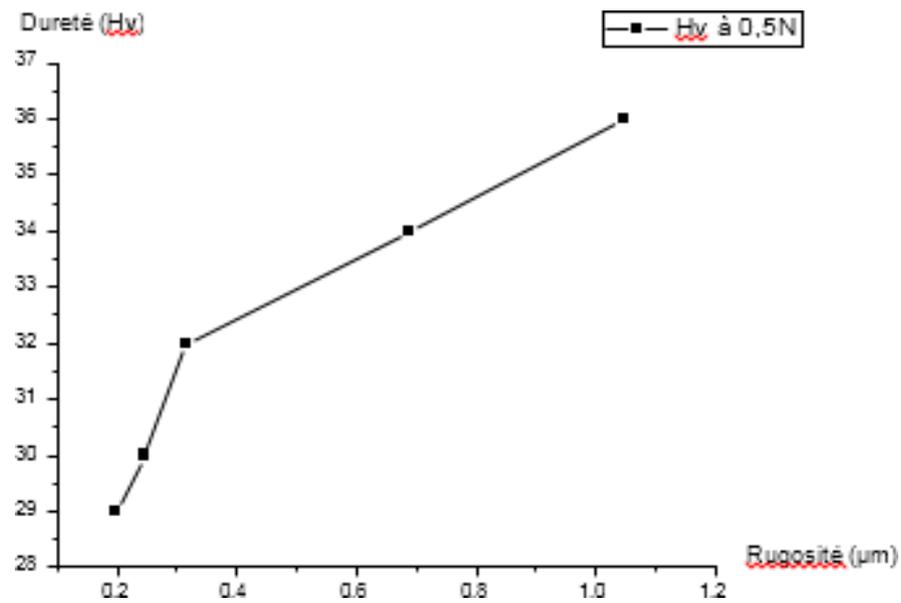
### III.3.3 Dureté en fonction de rugosité

On trace le graphe de dureté en fonction de rugosité à partir des points qu'on mesure la dureté et la rugosité au même point on obtient les figures suivantes :



**Figure III.13 : Variation de la dureté en fonction de la rugosité à proximité du centre de la pièce**

On constate que la dureté en fonction de rugosité à proximité du centre de la pièce tend vers une augmentation lente en intensité tout en s'éloignant du centre comme le montre la Figure III.13.



**Figure III.14 : Variation de la dureté en fonction de la rugosité à proximité de l'extrémité de la pièce**

Par contre à proximité de l'extrémité de la pièce, la dureté en fonction de la rugosité a augmenté rapidement en valeur comme le montre la Figure III.14.

## Conclusion

Dans ce chapitre nous avons parlé sur la méthode d'élaboration des échantillons ainsi que l'analyse et discussion des différents résultats pour chaque cas étudié.

# **Conclusion Général**

## Conclusion Générale

En se basant sur les résultats trouvés. On peut dégager les principales conclusions suivantes :

- La dureté Vickers diminue en s'approchant du centre de la pièce.
- L'état de surface montre une résistance à l'usinage dans les couches voisines de l'extrémité par une rugosité supérieure.
- L'état de compression instauré loin du centre défini par cette dureté revient aux contraintes résiduelles survenues lors de la mise en forme du matériau.
- Le gradient de température entre le centre et l'extrémité saepeurs le mot clé de la variation de dureté.
- Le contrôle de l'opération de refroidissement au moment de la mise en forme élimine les contraintes et divers tensions qui peuvent créer des zones de surface non uniformes.

# **Références Bibliographique**

## Références Bibliographiques

- [1] james-mean-marie haussonne ; claud carry ; paul bowen ; james barton. « céramique et verres » : université romandes, lausanne.
- [2] ; gilbert fantozzi, jean-claude niépce ,guillaume bonnefont ,les céramiques industrielles propriétés, mise en forme et applications
- [3] m-a.elguinahi,e.idriss, «produits céramiques : carreaux et sanitaires», école hassania.
- [4] b. jacquot, « propriétés mécaniques des biomatériaux utilisés en odontologie » société francophone de biomatériaux dentaires, 2009-2010.
- [5] s. benaissa, « élaboration et caractérisation d'une nano-céramique à usage optique », thèse. université ferhat abbas, 2018.
- [6] e. b. e. i. hicham, caractérisation des argiles utilisées dans le secteur de la terre cuite de la région de marrakech en vue d'améliorer la qualité des produits, thèse de doctorat : géologie appliquée, géoressource. faculté des sciences semlalia, 2017.
- [7] mr. safi brahim, « procédés et mise en forme des matériaux ; les produits céramiques », université boumerdes
- [8] bech-char h. mémoire, «procédé de fabrication des carreaux céramiques et étude des facteurs influençant la résistance à la flexion des carreaux crûs» ; 2021.
- [9] l.gremillard, « comportement des matériaux biomédicales » ensam, paris ; 30 janvier 2003.
- [10] r. lamloumi, comportement des matériaux minéraux de grande diffusion lors du séchage : étude expérimentale et modélisation, thèse de doctorat : procedes ceramiques et traitements de surface. l'université de limoges, 2015.
- [11] hani walid, marouf djilali, « etude des propriétés mécanique de céramique –carrelage » université abderrahmane mira bejaia 2018
- [12] beauquis s. joulaud c. lomello m. poulet g. « propriétés mécaniques des matériaux »
- [13]- v.m. ferreira, f. azough, r. freer, j.l. baptista, « the effect of cr and-la on mgtio3 and mgtio3–catio3 microwave dielectric ceramics », j. mater res 12 (1997) 3293- 3299.
- [14]- e.r. kipkoech, f. azough, r. freer, c. leach, s.p. thomposon, c. c. tang, « structural study of ca0.7nd0.3ti0.7a10.3o3 dielectric ceramics using synchrotron xray diffraction » j. eur. ceram soc 23 (2003) 2677–2682.
- [15]- l. zhou, p.m. vilarinho, j.l. baptista, «solubility of bismuth oxide in barium titanate», j.am. ceram soc 82[4] (1999) 1064–1066.
- [16] jean. marie. hausonne, paule bowen, james l-barton, titre céramiques et verres ; claude paule carry presse polytechnique et universitaires romandes.

- [17] taâmallah o. « effet des traitements mécaniques de surface (tms) sur l'écrouissage et la ténacité d'un acier » ; université badji mokhtar annaba, 2012.
- [18] soualah mohsin, influence des paramètres de coupe sur l'état de surface lors de l'usinage de l'acier xc55, université badji mokhtar annaba, 2017.
- [19] youcef hachem, prédiction de la rugosité des surfaces usinées l'ors de fraisage de l'acier aisi 1060 en utilisant la logique flou, université kasdi merbah ouargla, 2018
- [20] m.koizumi, t. okamoto, m.shimada american ceramic society, vol 63, (1984).
- [21] cour de fabrication mécanique, ressources usinage par enlèvement de matière : fraisage. académie lyon.
- [22] cour de fabrication mécanique, fraisage. ti153 travail des matériaux assemblage : procédés d'usinage.
- [23] cour de fabrication mécanique, procédés de fabrication par enlèvement de matière, université msila.
- [24] ifpm formation, cour de fabrication mécanique, usinage tournage fraisage
- [25] claude hazard, la commande numérique des machines-outils, les éditions foucher 1984
- [26] bouanik fouad : simulation de l'usinage d'un guidage longitudinal sous le logiciel sinutrain 828d shopmill, université badji-mokhtar-annaba 2017.
- [27] toulouh hakim, etude de conception et dimensionnement du système de perçage de trous de forme carré, université bejaia 2020.
- [28] b.vieille. méthodes et fabrications
- [29] ben sellam karim, technologie mécanique, école normale technique moyenne, mai 2010.
- [30] lakhdari. fouad, « contribution à l'étude de la surface et de la subsurface optique endomagee par des abrasifs », thèse.

## **Résumé**

L'objectif de ce travail est l'étude des contraintes résiduelles sur les propriétés mécaniques (la dureté Vickers, la rugosité de surface) des composites céramiques. La technique d'indentation Vickers instrumentée nous a permis de suivre l'évolution de la dureté HV, et la rugosité d'une céramique se réfère à l'aspect de sa surface.

En résumé, les essais de dureté et de rugosité sont des outils importants dans l'étude des céramiques, fournissant des informations précieuses sur les propriétés mécaniques des céramiques. Ils permettant d'évaluer la qualité de la surface, de comparer différents matériaux céramiques, d'optimiser les procédés de fabrication et de prédire le comportement en service.

---

## **Abstract**

The objective of this work is the study of residual stresses on the mechanical properties (Vickers hardness, surface roughness) of ceramic composites. The instrumented Vickers indentation technique allowed us to follow the evolution of the HV hardness, and the roughness of a ceramic refers to the appearance of its surface.

In summary, hardness and roughness testing are important tools in the study of ceramics, providing valuable information on the mechanical properties of ceramics. They make it possible to assess the quality of the surface, to compare different ceramic materials, to optimize manufacturing processes and to predict behavior in service.