الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

جامعة فرحات عباس – سطيف 1
UNIVERSITÉ FERHAT ABBAS – SÉTIF 1
UFAS (ALGERIE)

# THESE

Présentée à l'Institut d'Optique et de Mécanique de Précision

Pour l'obtention du diplôme de

## Doctorat En Sciences

École doctorale des technologies et des applications spatiales

Option : optique spatiale et mécanique de précision

Par
*M. Lakhdari Fouad*

# THEME

## CONTRIBUTION A L'ETUDE DE LA SURFACE ET DE LA SUBSURFACE OPTIQUE ENDOMMAGEE PAR DES ABRASIFS

Soutenue le : 12 / 01 / 2017 Devant le jury composé de :

| | | | |
|---|---|---|---|
| M. ALIOUANE Toufik | Pr. | Université de Sétif 1 | Président |
| M. BOUZID Djamel | Pr. | Université de Sétif 1 | Rapporteur |
| M. BELKHIR Nabil | Pr. | Université de Sétif 1 | Rapporteur |
| M. MAHTOUT Sofiane | Pr. | Université de Bejaia | Examinateur |
| M. ALLAOUI Omar | Pr. | Université de Laghouat | Examinateur |
| M. RAHMANI Mohamed | Pr. | Université de Laghouat | Examinateur |

# Remerciements

En tout premier lieu, je remercie le bon Dieu, tout puissant, de m'avoir donné la force pour survivre, ainsi que l'audace pour dépasser toutes les difficultés.

Je tiens à exprimer mes plus vifs remerciements à **M. Bouzid Djamel** professeur à l'université de Sétif 1, qui fut pour moi un directeur de thèse attentif et disponible malgré ses nombreuses charges. Sa compétence, sa rigueur scientifique et sa clairvoyance m'ont beaucoup appris. Ils ont été et resteront des moteurs de mon travail de chercheur.

Je tiens à remercier mon Co-encadreur de thèse **M. Belkhir Nabil** maitre de conférence à l'université de Sétif 1, à qui j'adresse mes remerciements les plus sincères pour sa disponibilité, ses conseils, ses encouragements et ses qualités humaines.

Mes sincères remerciements et ma gratitude vont à **M. Aliouan Toufik** professeur à l'université de Sétif 1, pour avoir accepté de juger ce travail et d'en présider le jury de soutenance. Que vous soyez assuré de mon entière reconnaissance.

Je remercie ensuite sincèrement les membres de mon jury : **M. Mahtout Sofiane** professeur à l'université de Bejaia, **M. Allaoui Omar** professeur à l'université de Laghouat et **M. Rahmani Mohamed** professeur à l'université de Laghouat en tant qu'examinateurs attentifs. Merci d'avoir pris le temps et d'avoir eu la patience de lire ce manuscrit, et d'y avoir apporté vos remarques.

Je tiens également à exprimer toute ma gratitude au **Dr.Ing.habil Herold Volker** pour m'avoir accueilli dans son laboratoire de technologie de surface à l'Institut des Sciences des Matériaux et Technologie à l'Université Friedrich Schiller de Jena (Allemagne), pour avoir mis à ma disposition tous les moyens

dont j'avais besoin pour le bon déroulement de cette thèse, pour son soutien et ses conseils avisés.

J'adresse de chaleureux et reconnaissants mercis au staff du laboratoire Technologie de Surface, de l'Université Friedrich Schiller de Jena (Allemagne) notamment ***Mr. Hampel, Frau Baesel*** et en particulier ***M.Andreas Koch*** pour les différents services qu'ils ont pu me rendre durant mon séjour.

Mes remerciements vont particulièrement à mon père, qui m'a constamment encouragé et soutenu tout au long de mes années d'études. J'adresse des remerciements de même ordre à ma mère, qui m'a élevée avec tendresse et m'a inculqué ce grand goût de dépassement de tous les obstacles.

Tous mes remerciements vont à mes amis, mes collègues à l'UROP et à l'IOMP qui m'ont aidé dans ce travail.

***Enfin je dédié ce travail à :***

- ***Mes parents.***
- ***Ma femme***
- ***Mon beau petit prince 'Mohamed Adam'***
- ***Mes frères 'Oussama , Saadoun et leurs familles'***
- ***Ma grande famille***
- ***Mes amis***

Introduction générale : ..... 1

# Chapitre I

1. Généralités sur les surfaces ..... 4
1.1. Introduction ..... 4
1.2. Définition d'une surface ..... 4
1.3. Défauts des surfaces optiques : ..... 5
1.3.1. Défauts de forme ..... 5
1.3.2. Rugosité ..... 8
1.3.3. Défauts locaux ..... 11
1.3.4. Indications des exigences d'états de surface ..... 12
1.3.5. Différents écarts géométriques de l'état de surface ..... 13
a) Ecart moyen arithmétique du profil évalué Ra, Wa, Pa ..... 14
b) Ecart moyen quadratique du profil évalué Rq, Wq, Pq ..... 15
c) Hauteur maximale des saillies du profil Rp, Wp, Pp ..... 15
d) Profondeur maximale du de creux du profil Rv, Wv, Pv : ..... 15
e) Hauteur totale du profil Rt, Wt, Pt ..... 15
f) Hauteur maximale du profil Rz, Wz, Pz ..... 15
1.4. Méthodes de mesure des états de surface ..... 15
1.4.1. Méthodes mécaniques ..... 16
1.4.2. Méthodes optiques ..... 21
1.4.3. Comparaison entre la méthode optique et la méthode mécanique (palpage) ..... 23
1.5. Traitement des surfaces optiques : ..... 24
1.6. Typologie des procédés avec abrasifs libres : ..... 25
1.7. Procédés d'usinage avec des abrasifs libres : ..... 26
1.8. Processus de rodage : ..... 29
1.8.1. Rodoir : ..... 30
1.8.2. Grains abrasifs : ..... 31
1.8.3. Liquide de rodage : ..... 33
1.9. Polissage : ..... 33
1.9.1. Abrasifs pour polissage : ..... 34
1.9.2. Polissoir : ..... 34
1.10. Finition magnéto-rhéologique *(Magnetorheological Finishing MRF)* : ..... 35
1.10.1. Application du processus MRF : ..... 36
1.11. Références bibliographiques ..... 38

# Chapitre II

2. Meulage assisté par ultrasons :.....40
2.1. Introduction :..... 40
2.2. Principe cinématique :..... 41
2.3. Meulage avec le régime ductile :..... 42
2.3.1. Principe du meulage avec le régime ductile :..... 42
2.4. Usinage par ultrasons de la Céramique ..... 44
2.4.1. Technologie ultrasonique :..... 44
2.5. Meulage assisté par ultrasons :..... 46
2.5.1. Fondamental :..... 46
2.5.2. Usinabilité des matériaux céramiques..... 47
2.6. Procédés de meulage assisté par ultrason..... 48
2.6.1. Meulage assisté par ultrasons avec excitation de l'outil : ..... 49
2.6.2. Meulage assisté par ultrasons avec excitation de la pièce :..... 54
2.6.2.1. Meulage périphérique avec assistance ultrasonique radiale :..... 54
2.6.2.2. Meulage périphérique avec l'assistance ultrasonique axiale : ..... 59
2.7. Conclusion : ..... 62
2.8. Référence bibliographiques :..... 63

# Chapitre III

3. La Subsurface endommagée dans les verres optiques : .....65
3.1. Introduction :..... 65
3.2. Endommagement de la subsurface dans les matériaux fragiles : ..... 66
3.3. Méthodes destructives..... 69
3.3.1. Technique de découpe d'interface collée (bonded interface sectioning technique) :.... 69
3.3.2. Méthode d'attaque chimique :..... 70
3.3.3. Usinage ionique focalisé (FIB : Focused Ion Milling)..... 72
3.3.4. Imprégnation de colorant : ..... 72
3.4. Méthodes d'évaluation non destructive :..... 73
3.4.1. Estimation de la SSD à partir de la rugosité de surface (P-V) et la taille des grains abrasives :..... 74
3.4.2. Diffusion laser et microscopie confocale :..... 76
3.4.3. Microscopie à réflexion interne totale (MRIT) ..... 79
3.4.4. Tomographie par cohérence optique (TCO) : ..... 80
3.5. Autres méthodes :..... 82

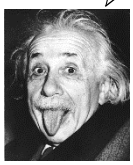
3.5.1. Interféromètre de la lumière blanche amélioré : 82
3.5.2. Points quantiques : 83
3.5.3. Technique de micro-indentation : 83
3.6. Conclusion : 84
3.7. Références bibliographiques : 85

# Chapitre IV

4. Etudes expérimentales et discussions : 90
4.1. Introduction : 90
4.2. Matériaux utilisés et procédures expérimentales : 91
4.3. Détermination de la résistance mécanique : 95
4.4. Indentation : 96
4.5. Mesure de la couche fissurée SSD : 97
4.5.1. Technique des fossettes (Dimple technique): 98
4.5.2. Technique de découpe d'interface collée (bonded interface sectioning technique) : 99
4.6. Résultats et discussions : 101
4.6.1. Vitrocéramique Zerodur® 101
4.6.1.1. Topographie de la surface : 101
4.6.1.2. Influence de la taille des grains abrasifs : 105
4.6.1.3. Evaluation de le couche endommagée SSD : 105
4.6.1.4. Influence de la profondeur de coupe : 107
4.6.1.5. Corrélation entre la profondeur de SSD et la rugosité de surface (P-V) : 110
4.6.1.6. Comparaison des résultats expérimentaux et le modèle de Li : 111
4.6.2. Verre sodocalcique : 112
4.6.2.1. Détermination de la rugosité : 112
4.6.2.2. Evaluation de la couche endommagée SSD : 114
4.6.2.3. Relation entre la SSD et la taille des grains abrasifs : 116
4.6.2.4. Corrélation ente la SSD et la rugosité de surface SR : 116
4.6.2.5. Détermination de la constante de proportionnalité K : 117
4.6.2.6. Détermination de la courbe d'étalonnage 118
4.6.2.7. Détermination de la contrainte à la rupture : 120
4.6.2.8. Validation de la courbe d'étalonnage : 121
4.7. Références bibliographiques : 122
Conclusion générale : 124

# Introduction générale

*“ Un problème sans solution est un problème mal posé. “*



*Albert Einstein*

*(1879 - 1955)*

# Introduction générale :

Le processus d'usinage et de façonnage par des abrasifs fixes, en l'occurrence le meulage est probablement le plus ancien dans l'existence, datant de l'époque de l'homme préhistorique qui a découvert qu'il pouvait aiguiser ses outils en les frottant contre des rochers graveleux. De nos jours, le meulage est un important processus de fabrication qui représente environ 20-25% des dépenses totales sur les opérations d'usinage dans les pays industriels.

Une compréhension des matériaux, leurs traitement et les propriétés finales, n'ont pas été toujours assez appréciée, elles sont absolument essentielles pour la conception et la fabrication des produits et à leurs performances et fiabilités.

Les progrès dans l'usinage des verres optiques et de la technologie de fabrication sont nécessaires pour l'élaboration de nouvelles technologies de traitement, qui peuvent conduire à l'élimination des étapes coûteuses, amélioration de la productivité, et à l'augmentant de la fiabilité du produit tout en réduisant son prix de revient.

Parmi les nouvelles techniques de fabrication actuelles, il y a le meulage assisté par Ultrasons *(Ultrasonic Assisted Grinding UAG).* Cette technique possède d'excellentes caractéristiques, comme une qualité de surface meilleure et un taux d'enlèvement de matière élevé, elle offre aussi la possibilité pour un usinage efficace et économique des composants fragiles.

Bien que les potentiels du processus d'UAG aient été globalement reconnus, il y a encore un manque flagrant d'analyses théoriques, en particulier l'influence de la vibration ultrasonore sur les mécanismes de formation de surface.

La surface optique réalisée par le procédé de meulage ou de rodage en utilisant des grains abrasifs en suspension ou agglomérés, présente superficiellement et en profondeur une couche dite couche endommagée (rugosité + microfissures), elle est influencée par l'agent de rodage employé (dureté et grosseur de la particule abrasive), par le type de verre et par d'autres paramètres technologiques liés aux conditions de travail. Cette couche dite SSD (SubSurface Damage) contribue à la diffusion et à l'instabilité de la surface, les fissures agissent comme concentrateurs des contraintes réduisant ainsi la résistance mécanique des composants optiques et influent sur les performances des éléments optiques, cette structure de surface n'est pas acceptable et doit être éliminée par polissage.

Ce travail vise à étudier la couche endommagée SSD et la qualité de surface générée lors du meulage conventionnel (Conventional Grinding CG) et du meulage assisté par ultrasons (Ultrasonic Assisted Grinding UAG) sur la vitrocéramique Zerodur® et le verre sodocalcique. Le but est de déterminer le processus le plus approprié d'usinage d'une part, et d'autre part de concevoir une nouvelle méthode destructive afin de calculer la profondeur de la couche endommagée en se basant sur la relation que l'on a établie entre la contrainte à la rupture et la profondeur de la SSD dans une courbe appelée, courbe d'étalonnage, et à partir de cette courbe on peut déduire la SSD du verre douci ou meulé soumis à l'essai de flexion à quatre points.

La présente thèse est subdivisée en quatre chapitres.

Le premier chapitre est réservé à un rappel théorique sur les surfaces optiques et le mode de leurs obtentions, nous avons également évoqués les différents défauts et leurs méthodes de mesure et de caractérisations ainsi que, des généralités sur les processus de rodage et de polissage.

Le deuxième chapitre est consacré essentiellement au meulage assisté par ultrasons qui a été utilisé dans notre travail pour l'usinage des échantillons de la vitrocéramique Zerodur®. Le principe cinématique et les procédés d'usinage ultrasonique ont été abordés.

Le troisième chapitre décrit la Subsurface endommagée dans les verres optiques et les différentes méthodes de leur évaluation (destructives et non destructives), parmi lesquelles on a adopté quelques-unes pour mesurer la couche endommagée.

Quant au quatrième chapitre nous présentons et discutons les résultats expérimentaux obtenus, il est devisé en deux parties : la première concerne l'étude de l'influence de l'assistance ultrasonique sur la profondeur de la couche fissurée de la vitrocéramique Zerodur® tandis que, la deuxième partie consiste à concevoir une méthode destructive afin d'évaluer la profondeur de la subsurface endommagée.

La thèse se termine par une conclusion qui résume les principaux résultats

# I Généralités et modes de traitements des surfaces

*“ Qui pense peu, se trompe beaucoup. “*

*Léonard De Vinci*

*(*1452 - 1519*)*

# 1. Généralités sur les surfaces

## 1.1. Introduction

Tous les matériaux ont des propriétés intrinsèques telles que la densité, la conductivité et le module d'élasticité. Les surfaces représentant les limites des matériaux peuvent être un peu plus insubstantielles, cependant il y a d'autres propriétés qui sont faciles à définir mais dont les valeurs semblent dépendre de la technique ou de l'échelle, Mesurer la rugosité du verre par exemple semble être une tache avec une difficulté supplémentaire qu'il n'est pas toujours facile à définir.

Le grand problème des procédés d'usinage mécanique sont les traces infiniment petites qu'ils laissent sur les pièces à usiner. Jusqu'à la fin de la deuxième décennie du vingtième siècle, aucune tentative mécanique ou autre n'a été conçue pour mesurer les surfaces, elles ont été seulement mesurées visuellement ou d'une manière tactile. Les tests très subjectifs étaient le seul moyen de comparaison entre une bonne et une mauvaise surface.

## 1.2. Définition d'une surface

La surface d'un corps solide est la partie de ce solide qui le limite dans l'espace et le sépare du milieu environnant, elle est prépondérante pour assurer des fonctions telles que :

- l'aptitude aux frottements
- la résistance à l'usure ou la corrosion
- conduction thermique ou électrique
- résistance aux contraintes mécanique
- étanchéité statiques ou dynamiques…etc.

La surface d'un solide constitue une recherche spécifique et un problème de conception. Le concept de la surface est perceptible et compréhensible par intuition, il est cependant très difficile à définir et à comprendre de façon bien précise. Habituellement la définition d'une surface n'est pas claire, en effet ce concept a été défini de plusieurs manières selon la discipline de la science ou de la technologie de l'objet à étudier.

La surface d'un solide est habituellement caractérisée par une structure et des propriétés qui sont diffèrents de l'intérieur du matériau (Whitehouse David 2002).

## 1.3. Défauts des surfaces optiques :

Une surface optique n'a jamais été parfaite, elle présente toujours des défauts classés selon leurs grandeurs.

### 1.3.1. Défauts de forme

Les surfaces optiques ont été depuis toujours produites par meulage et rodage ce qui permet d'obtenir des composants avec d'excellents états de surfaces et très peu d'ondulations. En revanche, elles peuvent engendrer des défauts de forme.

Les défauts de forme dégradent donc la surface d'onde comme les aberrations et réduisent la qualité de l'instrument.

Le défaut le plus classique créé par le rodage est celui appelé couronne concave ou couronne convexe, sa forme est proche de celle d'une surface d'onde affectée par de l'aberration sphérique ou de celle d'une période sinusoïde égale à un demi diamètre de pupille.

Les déformations dites en 'selle de cheval' ou défaut de cylindre proviennent souvent des contraintes créées au montage qui se relâchent ensuite au démontage. Elles produisent des surfaces ayant deux rayons de courbure principaux dont la forme est donc très proche de celle d'une surface d'onde entachée d'astigmatisme.

La figure 1.1 illustre les différents types de défauts de forme

-

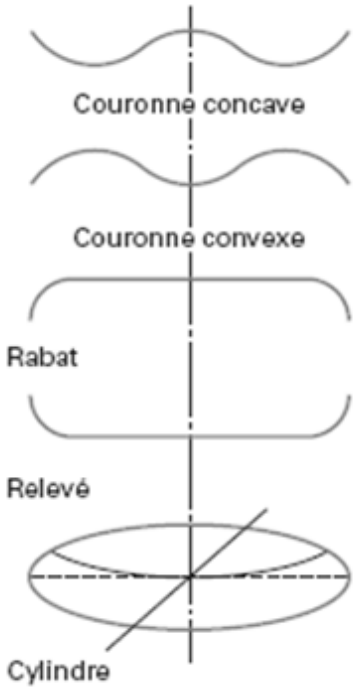



***Figure 1.1 :*** *Défauts de formes classiques d'une surface (Marioge J. P. 1993)*

Pour un dioptre affecté par un défaut de forme du type couronne concave ou couronne convexe criant sur la surface d'onde un défaut a de l'aberration sphérique dont l'écart de forme est obtenu par l'équation (1.1).

$$\delta_{max} = \frac{\lambda}{6.8(n-1)} \qquad (1.1)$$

Avec $\delta$ : écart de forme ; $\lambda$ : la longueur d'onde et n : l'indice de réfraction.

Pour un dioptre affecté par un défaut de forme du type 'défaut de cylindre' criant sur la surface d'onde une déformation assimilée à de l'astigmatisme la déformation maximale entre les deux méridiennes de la surfaces doit être inférieure à l'écart de forme représenté par l'équation (1.2).

$$\delta_{max} = \frac{\lambda}{5(n-1)} \qquad (1.2)$$

Les défauts de forme de la surface d'onde sont dus aux effets cumulés des défauts des différents dioptres et miroirs, en un point du champ on obtient un écart aberrant de l'ensemble en additionnent les écarts introduits par chacun des éléments, on peut en déduire la tolérance pour chaque dioptre ou chaque miroir du système dioptrique ou catadioptrique.

Si on suppose que chaque élément contribue avec le même poids ; La tolérance de chaque surface est atténué en divisant la valeur de l'écart de forme par N (nombre de surfaces dans un système optique), donc les défauts de forme des surfaces doivent être inférieurs à $\frac{\delta_{max}}{N}$, certains s'aventurent à diviser la tolérance générale que par $\sqrt{N}$ , les défauts de forme des surfaces doivent alors être inferieurs à $\frac{\delta_{max}}{\sqrt{N}}$ , les valeurs doivent être divisées par 4 pour un système à miroirs.

Les surfaces présentent toujours d'autres défauts qui n'ont pas tous le même sens et la même amplitude. Il y a donc des compensations partielles non systématiques. On peut chercher à améliorer un instrument en cherchant, par exemple, les compensations partielles des défauts de cylindre en tournant une à une les lentilles autour de l'axe optique (Marioge J. P. 2000a).

**a) Normes des défauts de formes**

Le contrôle de la forme des surfaces optiques est effectué, le plus souvent, avec des calibres de référence dont le rayon est imposé. Pour pouvoir déceler une déformation de la surface, l'opticien est obligé de le choisir très proche du rayon de la surface en cours de polissage.

Cela conduit bien souvent à ajuster le rayon de la surface usinée avec une tolérance plus sévère que celle demandée par le calculateur opticien. Pour réduire les coûts de production, dans le cas des séries importantes, certains ateliers utilisent plusieurs calibres entourant la valeur nominale.

**b) Différents types de défauts de forme**

**a) Différence de rayon de courbure**

Le calibre de référence et la surface en cours de fabrication n'ont pas le même rayon de courbure. On obtient des franges circulaire, dite anneaux de Newton. Si les centres de courbures sont confondus, on observe une teinte dite 'teinte plate'. Les nombres de franges obtenues, quand les deux surfaces sont en contact, permet de connaitre la différence entre les deux rayons de courbure.

**b) Défauts de révolution**

La surface est affectée d'un défaut de forme ayant un axe de symétrie. Dans ce cas, les diamètres des anneaux ne suivent pas la loi de Newton, ou si l'on forme un coin d'air, les franges ne sont pas droites. L'écart par rapport à la frange régulière permet de chiffrer le défaut en nombre d'interfranges.

**c) Défauts de non-révolution**

Le défaut n'a plus d'axe de symétrie. On chiffre ici la déformation de non-révolution de la surface.

**d) Défauts localisés**

Les défauts les plus courants de ce type sont les creux, les bosses, le rabat, le relevé et les facettes. Les franges ne sont plus régulières, mais présentent des variations brutales de pente. L'écart par rapport à la frange régulière caractérise le défaut local.

**c) Représentation sur les dessins**

**a) Normes française AFNOR NF S 100-007 (Tab. 1.1)**

La longueur d'onde de référence est 546,1 nm. Elle chiffre l'écart de sphéricité par rapport à la meilleure sphère :

***Tableau 1.1 :*** *Valeurs des défauts de formes de la norme française AFNOR NF S 100-007*

| **Symbole représentatif d'un défaut de forme** | **Nombre max d'interfranges ou de fractions d'interfrange de révolution tolérée** | **nombre max d'interfranges ou de fractions d'interfrange de non-révolution tolérée** | **Nombre max d'interfranges ou de fractions d'interfrange toléré** | **Défauts max tolérés, tous défauts confondus.** |
|---|---|---|---|---|
| | 1 | (0.25) | (0.5) | 0.5 cc |

Les valeurs des défauts sont exprimées en nombre d'interfranges (if) et en valeurs crête à crête. Elles peuvent se situer de part et d'autre de la sphère de référence sauf les défauts de non révolution pour lesquels on doit indiquer le sens (concave ou convexe).

**b) Norme allemande DIN 3140 (Tab. 1.2)**

Elle chiffre l'écart de sphéricité par rapport au calibre. La longueur d'onde de référence est 546.1 nm.

***Tableau 1.2 :*** *Valeurs des défauts de formes de la norme allemande DIN 3140*

| **Numéro caractéristique d'un défaut de forme** | **Nombre max de franges ou de fraction de frange toléré entre la surface et le calibre de la référence en + ou en -.** | **Nombre max de franges ou de fraction de frange toléré entre deux directions perpendiculaires.** | **Nombre max de franges ou de fraction de frange toléré pour un défaut local (régularité de la frange).** |
|---|---|---|---|
| 2 | 2 | (0.2) | 0.5 |

Les valeurs des défauts sont exprimées en nombre de franges et en valeurs crête à crête.

### 1.3.2. Rugosité

Bien que très performant le polissage optique ne produit jamais des surfaces absolument parfaites, il y a toujours quelques défauts locaux, dus à la matière première, à des chocs, aux ondulations appelées rugosités.

**a) Ecart type du profil**

Si l'enregistrement est linéaire, le profil est défini par la hauteur Z en fonction de l'abscisse ρ. Si la mesure est faite sur un élément de surface cette hauteur est fonction des coordonnées X

et Y. l'enregistrement du profil étant fait on déplace le ou les axes de références parallèlement jusqu'aux valeurs moyennes telles que les aires ou les valeurs positifs ou négatifs soient égaux sur la longueur L ou la surface S.

La valeur quadratique moyenne et la variance sont alors obtenues en calculant la valeur moyenne des carrés des écart-type Z à la valeur moyenne :

$R_{q1}^2 = \lim_{L\to\infty} \int_0^L |Z(\rho)|^2 \, d\rho$ A une dimension (1.3)

$R_{q2}^2 = \lim_{S\to\infty} \iint_S |Z(X,Y)|^2 \, dxdy$ A deux dimensions (1.4)

$R_{q1}$ racine carré de la variance à une dimension est dite : RMS *(root mean square value).*

La valeur Rq dépend de :

- la longueur L ou la surface S explorée, puisque la fréquence spatiale la plus basse en dépend.
- la valeur de la plus haute fréquence que l'instrument de mesure est capable de détecter.
- l'échantillonnage lors de numérisation.

Il est donc important que ces paramètres soient bien indiqués lors de la qualification d'une surface et surtout lors d'intercomparaisant de résultats de mesure (Marioge J. P. 1993).

**b) Différents types de défauts de la rugosité**

**a) Micro-ondulations de la surface**

L'origine de ces défauts n'est pas bien connue, ils sont probablement dus à des phénomènes de rhéologie.

**b) Micropiqûres**

Elles sont dues à un polissage insuffisant de la surface qui laisse en superficie les fonds des excavations ainsi que les traces des particules arrachées provenant des langues produites pendant l'ébauchage et le doucissage et qui se rejoignent et forment des éclats qui se détachent. Elles sont mesurées en déplaçant, par exemple, la pointe d'un stylet très fin sur la surface et en comptant le nombre de piqûres pour un déplacement donné.

### c) Normes de rugosité

#### a) Normes AFNOR S10-01

Les surfaces sont classées en :

- Surfaces brutes désignées par
- Surfaces obtenues par déformation à chaud sans usinage ultérieur, désignées par $F_n$
- Surfaces ébauchées non polies (faces arrières de miroirs, joues de prismes, etc. désignées par $D_n$
- Surfaces polies désignées par $P_n$
- Surfaces usinées à la pointes diamant désignées par Pn DIA

Sous le signe peut être indiqué si la spécification prend en compte les rugosités parallèles et perpendiculaires à la trace de l'outil, = ou ⊥ si ces tolérances sont données pour un stylet de mesure se déplaçant parallèlement ou perpendiculairement ou stries d'usinages.

Avec n est un indice variable de 0 à 5 choisi à l'aide d'un abaque en fonction de la valeur de Rq

#### b) Norme ISO

Les surfaces sont classées en :

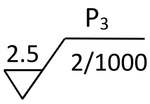
- Surfaces ébauchées et doucies définies par la valeur de la rugosité et la longueur de l'échantillonnage.

Exemple : 2.5 G 5 avec Rq = 2.5 nm et une longueur d'échantillonnage de 5 mm.

- Surfaces polies pour lesquelles doivent être définies deux caractéristiques :

Le « fond poli », c'est-à-dire le reliquat du douci, dû à un polissage insuffisant. Il est caractérisé par le nombre de piqûres décelées sur un segment de droite d'une longueur de 10 mm.

La rugosité est définie par la valeur quadratique moyenne Rq avec la longueur sur laquelle est faite la mesure.

Exemple : 

correspond à une surface polie avec moins de 16 microdéfauts sur une course de 10 mm et une valeur de rugosité Rq de 2.5 nm sur une longueur d'échantillonnage comprise entre 2 et 1000 mm.

#### 1.3.3. Défauts locaux

Les principaux défauts locaux sont :

- **Les ébréchures :** éclatement des bords et des arêtes.
- **Les rayures et frayures :** sillons continus ou discontinus dont la largeur et la profondeur peuvent être irrégulières, la frayure étant une petite rayure.
- **Les filandres :** défauts superficiels continus linéaires, visibles sous certaines incidences seulement.
- **Les piqures :** défauts ponctuels de surfaces.
- **Les gris localisé :** concentration de piqures de faibles dimensions ne couvrant qu'une partie de la surface.
- **Les bulles crevées :** défauts dus à des inclusions gazeuses dans la matière débouchant sur la surface.
- **Les camps marque et traces :** laissées pour une mauvaises manipulation.

A ces défauts locaux, il faut ajouter les taches d'oxydations locales et les défauts de traitement de surfaces. Les défauts locaux agissent sur les images soit parce qu'ils sont opaques, soit parce qu'ils dévient ou diffractent la lumière, leur action dépend essentiellement de la surface qu'ils occupent dans le faisceau formant l'image de leurs positions dans le système optique (Marioge J. P. 2000b)

**a) Normes des défauts locaux**

a) **Norme DIN ISO 10110-7**

Elle se réfère à un paramètre lié à la sommation des aires des défauts élémentaires. Deux nombres *A* et *S* caractérisent les tolérances des surfaces pour les défauts locaux : *A* est le nombre de défauts locaux autorisés ; *S* est un nombre qui caractérise la dimension du défaut : c'est la longueur du côté d'un défaut carré ayant la même aire que le défaut observé.

**b) Norme MIL 13830**

- **Piqûres** : La somme des diamètres de toutes les piqûres détectées, de diamètre égal ou inférieur, ne doit pas dépasser deux fois le diamètre de la piqûre maximale tolérée et indiquée sur le plan. Le contrôle d'une surface polie est fait par comparaison visuelle avec des défauts standards. Le composant est rejeté s'il y a des rayures qui sont plus visibles que celles spécifiées ou si le diamètre des piqûres est supérieur à la classe retenue.
- **Rayures** : le premier chiffre donne le numéro de la rayure de référence (*scratch number*). Sa visibilité ne doit pas être dépassée.

Les défauts de la surface sont comparés à des défauts étalons tracés sur des plaquettes observées dans des conditions décrites trop succinctement. Aucune rayure de largeur supérieure à la largeur maximale ne peut être tolérée. Il y a donc un mélange entre la notion de visibilité pour les rayures et de dimension des défauts pour les piqûres. Les spécifications sont indiquées par deux chiffres, l'un pour les rayures, l'autre pour les piqûres.

**c) Norme NF ISO 10110-7**

C'est la plus simple. Elle ne prend pas en compte la somme des aires élémentaires des défauts, mais seulement la visibilité de chacun d'eux. Pour classer les échantillons, on les éclaire à des niveaux de luminance normalisés. Des classes de qualité ont été définies en transmission et en réflexion. Elles définissent le niveau d'éclairement de l'échantillon pour chacune de ces classes en transmission et en réflexion. Elle reprend deux des normes déjà exposées : la norme DIN ISO 10110-7 dite norme métrique et la norme NF ISO 10110-7 dite norme de visibilité.

### 1.3.4. Indications des exigences d'états de surface

Les indications des exigences d'états de surface sont précisées à l'aide de symboles graphiques et d'indications textuelles. Le tableau 1.3 indique la signification de chaque symbole graphique.

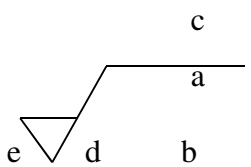
***Tableau 1.3 :*** *Symboles de base.*

| Symbole graphique | Signification |
|---|---|
| | Symbole graphique de base, tout procédé de fabrication autorisé |
| | Enlèvement de matière exigé |
| | Enlèvement de matière interdit |
| | Symbole graphique complet |
| | Pour toutes les surfaces sur le contour de la pièce |

Ces symboles graphiques doivent être complétés par l'indication d'un ou plusieurs paramètres d'états avec leurs valeurs numériques.

Il est parfois nécessaire de préciser d'autres exigences, telles que le procédé de fabrication, les conditions de mesures, etc.

La position des différentes exigences d'état de surface est indiquée sur la figure 1.2




a : paramètre d'état de surface suivi de la valeur numérique

b : paramètre d'état de surface suivi de la valeur numérique, si plusieurs paramètres spécifiés

c : procédé de fabrication

d : stries de surface et orientation

e : surépaisseur d'usinage

***Figure 1.2 :*** *Position de différentes exigences d'état de surface* (Whitehouse David 2002).

### 1.3.5. Différents écarts géométriques de l'état de surface

Tous les objets et notamment les pièces constitutives des produits industriels, présentent des surfaces diverses avec pour chacune d'elles une fonction associée qui va de la simple

limitation de la matière à la réalisation d'une étanchéité dynamique en passant par la tenue d'un revêtement ou la biocompatibilité d'une prothèse médicale par exemple.

La microgéométrie de la surface intervient souvent de façon déterminante dans son aptitude à satisfaire la fonction attendue.

Par exemple au niveau des interfaces entre les pièces d'un assemblage avec un mouvement relatif, les différents phénomènes de contrainte et de frottements évoluent continuellement jusqu'à la perte de performance qui va entraîner la déficience du mécanisme.

La maîtrise de l'état de surface par le choix d'un ou plusieurs paramètres adaptés permettra de garantir la qualité de fonctionnement tout au long de la durée de vie du produit (Whitehouse David 2003)

**a) Ecart moyen arithmétique du profil évalué Ra, Wa, Pa**

Le paramètre Ra est universellement reconnu, il est le paramètre de la rugosité le plus utilisé, c'est la moyenne arithmétique des valeurs absolues des ordonnées z(x) a l'intérieure d'une longueur de base. L'élaboration de la valeur Ra est illustrée dans la figure 1.3.

La formule utilisée pour le calcul de Ra est la suivante.

$$R_a = \frac{1}{l_r}\int_0^{l_r} |z(x)|\, dx \qquad (1.5)$$

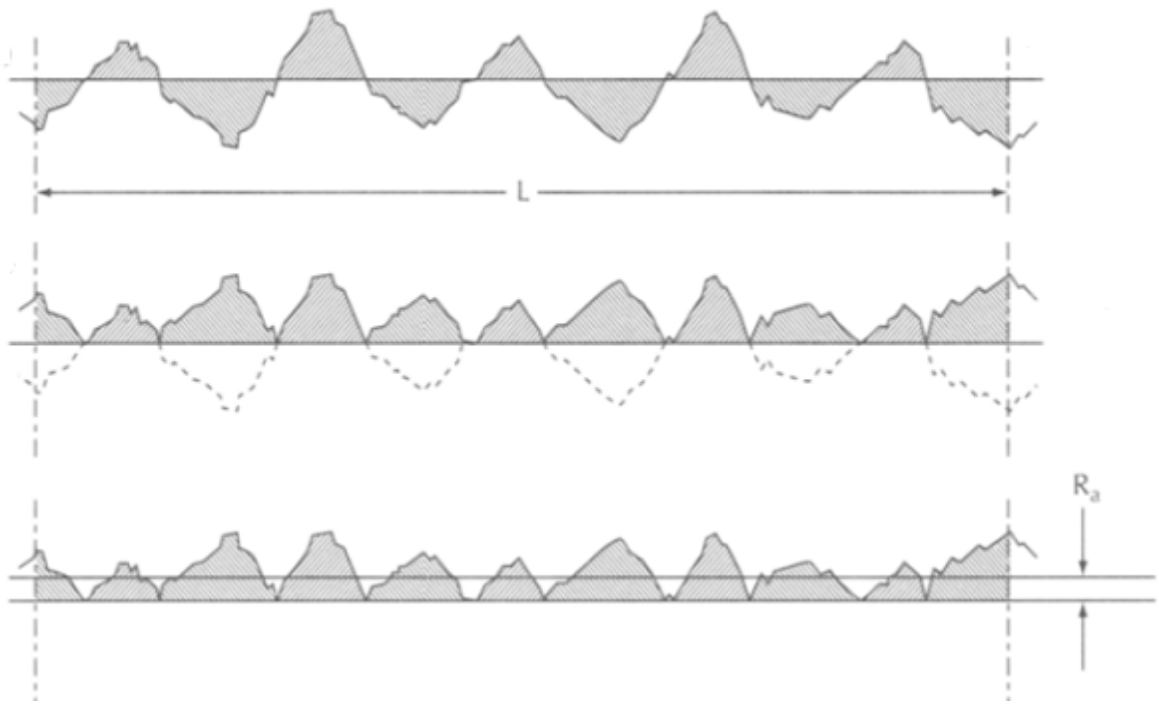



***Figure 1.3 :*** *Paramètre Ra (Whitehouse David 2002)*

**b) Ecart moyen quadratique du profil évalué Rq, Wq, Pq**

Rq est le paramètre rms (root mean square) c'est moyenne quadratique des valeurs des ordonnées *Z(x),* à l'intérieur d'une longueur de base.

$$R_q = \sqrt{\frac{1}{l_r}\int_0^{l_r} z(x)^2\,dx} \qquad (1.2)$$

**c) Hauteur maximale des saillies du profil Rp, Wp, Pp**

Plus grande des hauteurs de saillie du profil, à l'intérieur d'une longueur de base.

**d) Profondeur maximale du de creux du profil Rv, Wv, Pv :**

Plus grande des profondeurs de creux du profil, à l'intérieur d'une longueur de base.

**e) Hauteur totale du profil Rt, Wt, Pt**

Somme de la plus grande des hauteurs de saillie du profil, et de la plus grande des profondeurs de creux du profil, à l'intérieur d'une longueur d'évaluation.

La figure 1.4 indique les paramètres Rp, Rv et Rt.

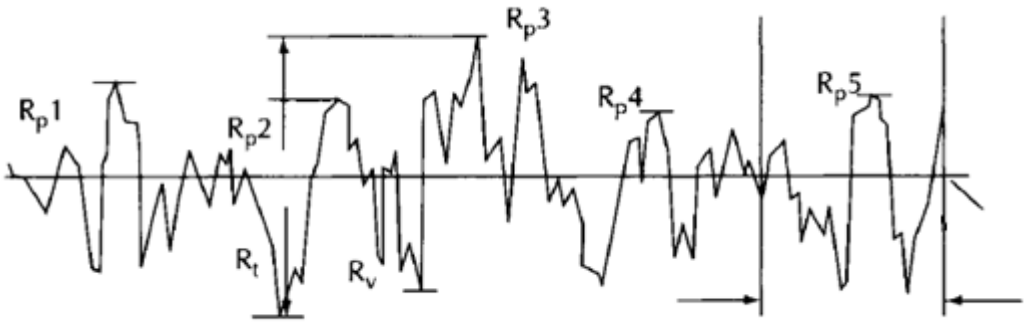



***Figure. 1.4 :*** *Paramètres Rp, Rv et Rt*

**f) Hauteur maximale du profil Rz, Wz, Pz**

C'est la somme de la plus grande des hauteurs de saillie du profil, et de la plus grande des profondeurs de creux du profil, à l'intérieur d'une longueur de base.

## 1.4. Méthodes de mesure des états de surface

Pour mesurer l'état de surface, Il existe différents instruments, mais avant de pouvoir les utiliser correctement, il faut d'abord se poser un certain nombre de questions de base :

- Sont-ils corrects selon la théorie cinématique ? C'est-à-dire qu'ils ont le nombre de contraintes exigé pour s'assurer que les degrés de liberté se conformant aux mouvements exigés.
- Où sont les sources de chaleur et de vibration ? Sont-elles présentes ? Comment peuvent-elles avoir une influence sur les performances de l'instrument ?
- Quelles sont les autres sources d'erreurs ? Peuvent-elles être réduites par compensation ou annuler ?

Il existe plusieurs moyens d'évaluer l'état de surface que l'on peut classer en deux groupes selon que l'évaluation est effectuée sur une surface ou sur un profil (Raphet Bernard 2008).
Ces moyens sont utilisés :

- soit couramment dans l'industrie, appareil à palpeur avec contact (méthodes mécaniques).
- soit plus rarement pour des applications spécifiques, appareil à palpeur sans contact, (méthodes optiques).
- soit encore plus rarement dans des laboratoires de recherche et de développement.

### 1.4.1. Méthodes mécaniques

En raison de leurs simplicités et leurs grandes diversités, les méthodes mécanique peuvent englober une vaste gamme de paramètres de rugosité, les instruments conventionnelles de mesure de surfaces utilisant ces méthodes présentent certains inconvénients tels que :

- Technique relativement lente.
- La force du palpeur peut parfois endommager la surface.
- Limitation sur des secteurs de mesure.

Les avantages évidents sont :

- Souplesse pour adopter une large diversité de forme.
- Très haute résolution dans la direction verticale (Hicks T. R. & Atherton P. D. 2000).

#### a) Appareils à palpeur

Dans l'industrie le moyen le plus utilisé est l'appareil de mesure d'état de surface à palpeur, avec contact de ce dernier sur la surface à caractériser (profilomètre mécanique 2D). Suivant

son degré de perfectionnement, ce type d'équipement permet la mesure de tous ou parties des paramètres d'états de surface. En effet, l'évaluation des paramètres de profil primaire et d'ondulation nécessite une référence de guidage externe.

La figure 1.7 représente, de façon schématique, un appareil à palpeur dont les différents composants sont définis ci-après :

- **chaîne de mesure** : chaîne fermée qui comprend tous les éléments mécaniques reliant la pièce à mesurer et la pointe du palpeur ;
- **référence de guidage** : composant de l'appareil qui génère le plan d'intersection et guide le capteur dans ce plan selon une trajectoire théoriquement exacte (profil de référence), qui est généralement une ligne droite ;
- **unité d'avance** : composant de l'appareil qui déplace le capteur le long de la référence de guidage, ce dernier transmettant la position horizontale de la pointe du palpeur sous forme de coordonnée horizontale du profil ;
- **capteur** : composant de l'appareil qui contient l'élément de palpage, avec la pointe du palpeur, et le transducteur ;
- **élément de palpage** : élément qui transmet le déplacement de la pointe du palpeur au transducteur ;
- **pointe du palpeur** : élément constitué d'un cône nominalement circulaire ayant un angle défini et d'une extrémité nominalement sphérique avec un rayon défini ;
- **transducteur** : dispositif qui convertit les coordonnées verticales du profil tracé par rapport au profil de référence en un signal utilisé dans l'appareil ;
- **amplificateur** : dispositif qui effectue une transformation du signal dans l'appareil sans provoquer de modification intentionnelle du profil ;
- **convertisseur analogique-numérique (ADC)** : dispositif qui convertit le signal de l'appareil en valeurs numériques.

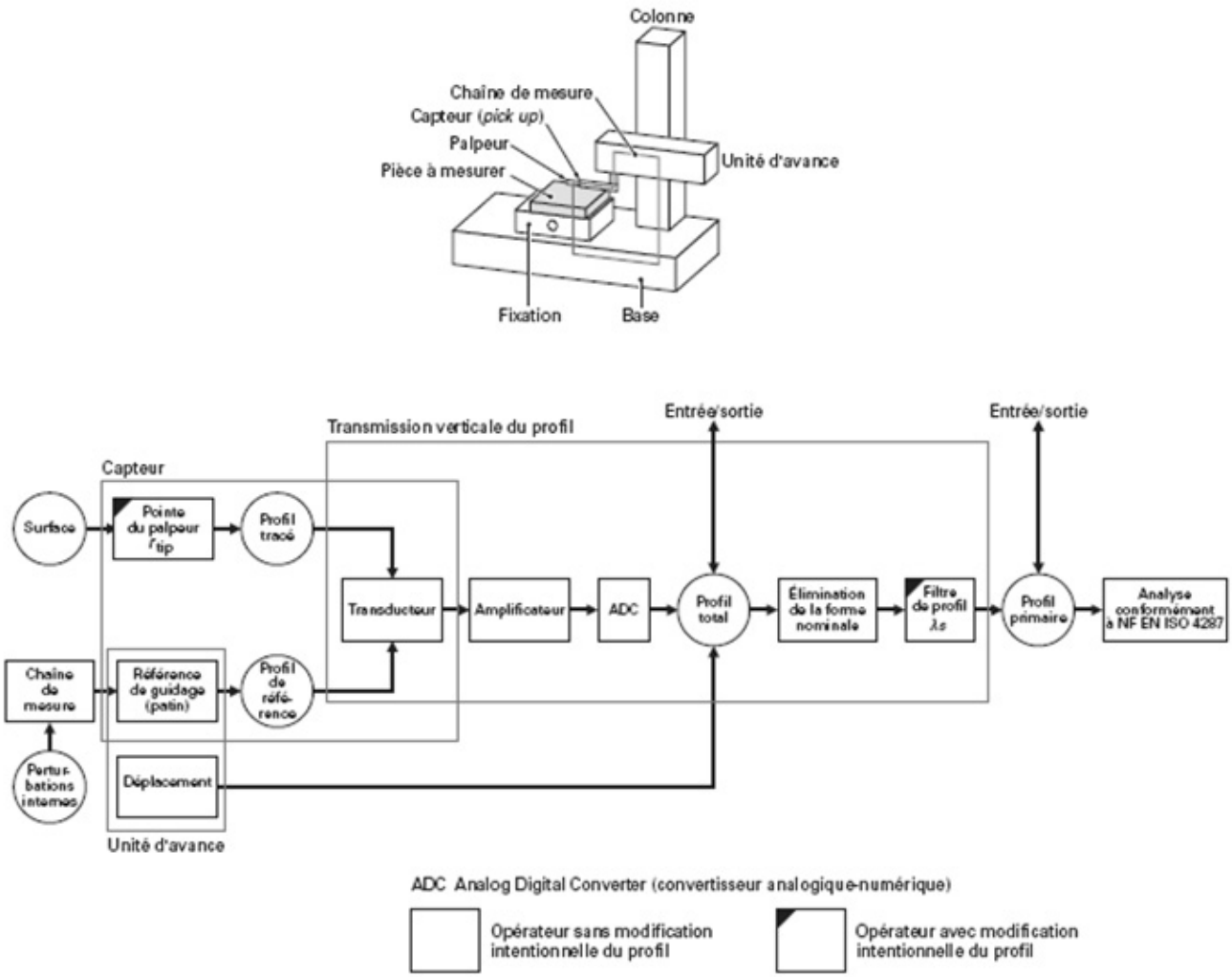



***Figure 1.7 :*** *Représentation schématique d'un appareil à palpeur (Raphet Bernard 2006)*

#### 1.4.1.a.1. Principe de mesure

Un convertisseur inductif différentiel (transducteur) transforme en une tension proportionnelle la composante verticale des mouvements d'un palpeur qui se déplace sur la surface rugueuse. Le profil de la surface analysée est enregistré. Le capteur est associé à un ensemble électronique qui effectue l'amplification, l'échantillonnage, l'acquisition et la conversion du signal, il est alors transmis vers un micro-ordinateur, qui calcule les paramètres de rugosité

Cet instrument à fait l'objet de nombreuse publication qui décrivent des possibilités d'amélioration de ses perfections. La sensibilité peut être abaissée à quelques centièmes de nanomètre et le bruit instrumental à 0.03 nm. Le stylet (pointe de palpeur) peut avoir diverses formes et en particulier, celle d'un cône dont la pointe a un rayon de 0.5 µm. la force d'appui bien réglée, peut être inférieure à 10 µN.

La résolution spatiale dépend de la pente des défauts et de la géométrie du stylet ; elle a une limite théorique de 0.1 µm. la fidélité de mesure (écart entre deux mesures consécutives sur la même zone d'un échantillon) est de l'ordre de quelques centièmes de nanomètre sur la valeur rms de la rugosité (Arvinth Davinci M. et al. 2014).

#### 1.4.1.a.2. **Mesure tridimensionnelle**

La caractérisation de l'état d'une surface ne peut se limiter à l'analyse d'une trajectoire. L'objectif recherché est la caractérisation et l'analyse de l'intégralité d'une surface ou d'une portion de surface est pour connaître son relief, sa texture et ses défauts de surface.

Les avancées technologiques repoussent toujours la connaissance et la mesure des états de surface. Ces dernières années ont vu un grand développement d'équipements destinés à la quantification de la topographie de surface, grâce à l'évolution :

- des appareils de mesure à contact (ajout d'un troisième axe de mesure).
- de la microscopie à haute résolution.
- du traitement de l'information et du traitement d'image.

La mesure tridimensionnelle des états de surface dépasse le cadre du contrôle qualité des surfaces sur des produits industriels.

L'image tridimensionnelle permet d'augmenter les possibilités d'analyse de la texture des surfaces.

Elle est destinée davantage à la recherche et à l'expertise et permet ainsi d'optimiser la fonction pour laquelle est destinée une surface, frottement, adhérence, étanchéité, lubrification, écoulement, etc.

Les problèmes rencontrés dans la mesure du profil de surface sont négligeables par rapport à ceux rencontrés dans la mesure tridimensionnelle qui sont communs à tous les instruments et sont comme suit :

a- Maintenir des données de la hauteur précise entre les trajectoires.

b- Adopter un model numérique approprié.

c- Adopter un modèle d'échantillonnage qui permet a assez de zones d'être suffisamment couvertes avec un temps et un prix raisonnable.

d- Maintenir une résolution suffisante pour détecter les défauts et autres caractéristiques non-standards (Elmas S. et al. 2011).

#### 1.4.1.a.3. Topographie des surfaces

En raison de la nature des défauts, la première tentative sérieuse de tracer des surfaces a été faite dans les travaux de Williamson (Williamson J. B. P. 1967) (voir figure 1.8).

Bien que les premières méthodes interférométriques étaient excellentes pour dimensionner les grandes surfaces planes avec des irrégularités locales, elles sont difficiles à utiliser et à interpréter sur des surfaces rugueuses.

La progression de la microscopie électronique a révélé pour la première fois des détails très fins, mais il ya jusqu'à ce jour deux limitations principales ; la première étant la difficulté d'obtenir des données quantitatives et l'autre le faite que son champ visuel est limité.

La microscopie électronique a tendance à tromper les scientifiques à se concentrer sur le comportement individuel des aspérités plutôt que pour considérer les propriétés globales de la surface (Whitehouse David 2003).

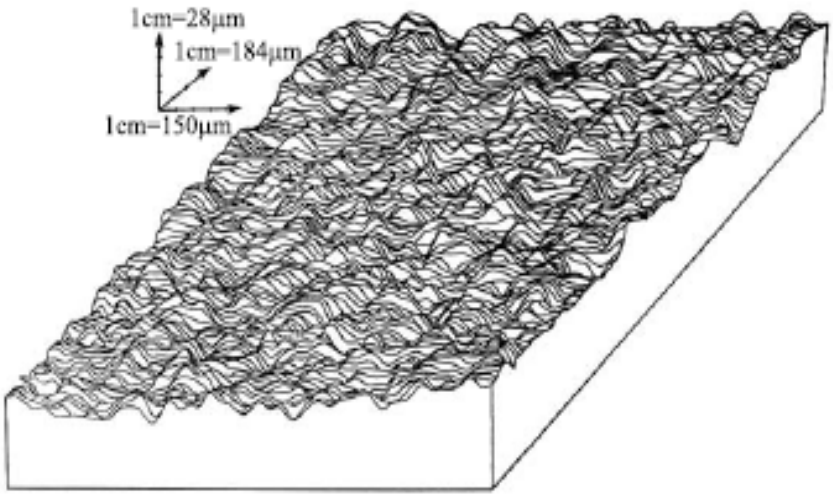



***Figure 1.8 :*** *Topographie d'une surface (Williamson J. B. P. 1967)*

### 1.4.2. Méthodes optiques

#### a) Profilomètre laser

Ces méthodes sont très proches de la méthode par contact, à savoir qu'elles nécessitent l'exploration de la surface au moyen d'une série de trajectoires parallèles régulièrement espacées par déplacement de l'échantillon ou de la source. Les coordonnées *Z* sont acquises à l'aide d'un capteur optique à source laser. La méthode peut être coaxiale ou basée sur le principe de la triangulation suivant que le faisceau émis et le faisceau réfléchi suivent le même trajet ou une trajectoire différente. La figure 1.9 illustre le principe d'un profilomètre laser.

La méthode coaxiale nécessite un système de déplacement vertical permettant l'asservissement du point de focalisation du faisceau laser sur la surface.

L'exploitation des données, calcul des paramètres et visualisation de la surface, se fait avec les mêmes outils que ceux utilisés par la méthode avec contact.

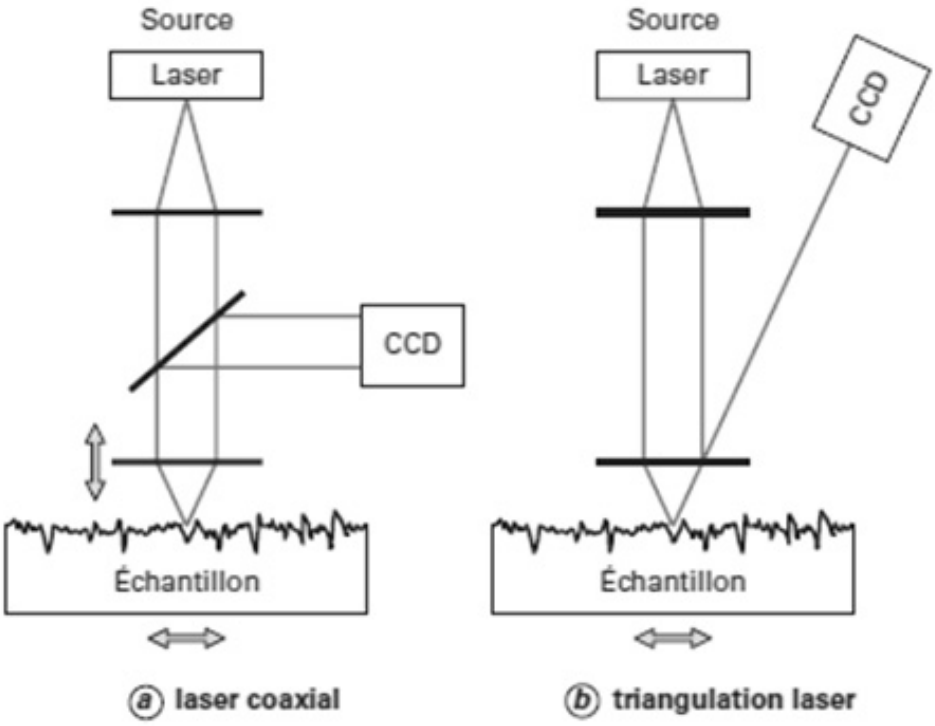



***Figure 1.9*** *Méthodes par profilométrie laser (Raphet Bernard 2006)*

**b)Méthodes de mesure interférométrique**

L'interférométrie est habituellement utilisée pour la mesure d'une longueur donnée par comparaison de deux chemins optiques. La figure 1.10 montre d'une façon simplifiée ce principe.

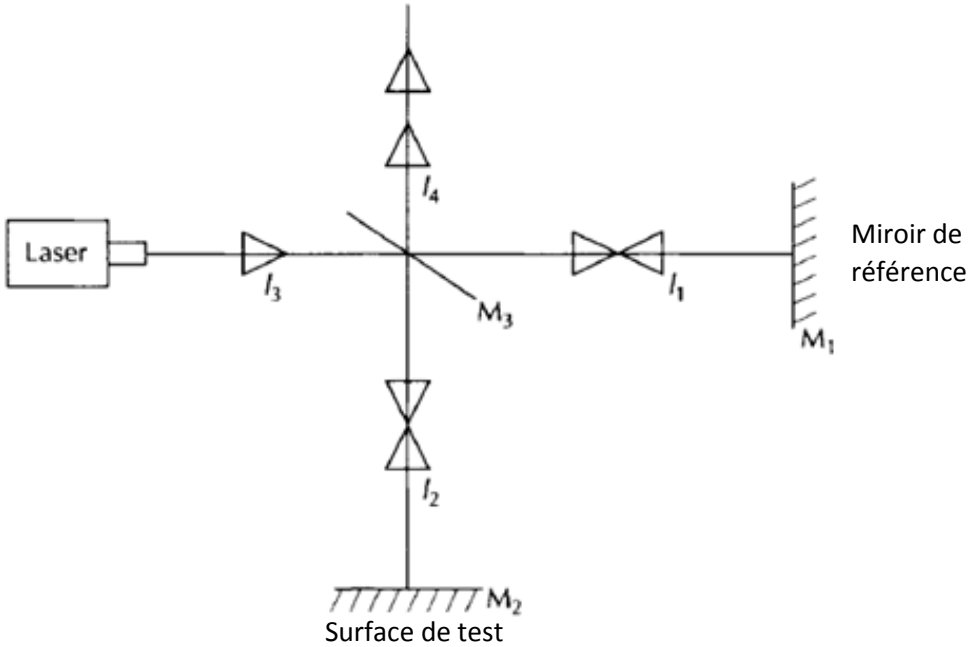



***Figure 1.10 :*** *Principe de mesure interférométrique (Brodeman R. 1986)*

La lumière d'une source est divisée à l'aide d'un miroir séparateur, une partie du faisceau est dirigé sur la pièce, l'autre sur un miroir de référence. Après réflexion, les deux faisceaux sont de nouveau superposés au niveau du miroir séparateur.

Le chemin de référence est $l_3 + l_1 + l_4$ tandis que le chemin d'essai (à mesurer) a une longueur $l_3 + l_2 + l_4$, la comparaison doit se faire entre $l_1$ et $l_2$ et leurs combinaison dépend de leurs différences de phase parfois en les additionnant et parfois en les soustrayant sous une lumière cohérente.

Si le miroir $M_1$ est fixe, la longueur $l_2$ peut être déterminée en comptant le nombre de maxima vue par l'œil, chaque maxima correspond a une différence de marche de $\lambda/2$ entre $l_1$ et $l_2$, le balayage des deux miroirs $M_1$ et $M_2$ est normal (perpendiculaire) (Brodeman R. 1986)

### 1.4.3. Comparaison entre la méthode optique et la méthode mécanique (palpage)

Le faite que les méthodes optiques sont strictement fondées sur des lois d'optiques peuvent être un avantage comme elles peuvent être un inconvénient, par exemple si la résolution est fixée alors l'angle opposé à la lentille ne peut pas être changé par conséquent aucun de ces trois éléments : angle, la résolution, et le point focale ne peut être changé sans affecté les autres.

Avec la méthode de palpage il est possible d'orienter l'angle du palpeur et de changer la dimension de la pointe du palpeur sans affecté l'un vis a vis de l'autre.

Le tableau 1.5 montre une comparaison simple des propriétés des deux méthodes de mesure (optique et mécanique)

Chaque avantage est indiqué dans la colonne approprié avec la couleur verte.

***Tableeau 1.5 :*** *Comparaison entre la méthode mécanique et la méthode optique*

| Méthode mécanique | Méthode optique |
|---|---|
| 🔴 Endommagement possible | 🟢 Pas d'endommagement |
| 🟢 Mesure la géométrie | 🔴 Mesure le chemin optique |
| 🟢 La dimension de la pointe du palpeur et l'angle de palpeur sont indépendante | 🔴 La résolution et l'angle d'inclinaison sont dépendent l'un de l'autre. |
| 🔴 La pointe peut se casser | 🟢 La sonde ne peut pas être cassée |
| 🟢 Insensible à l'inclinaison de la pièce | 🔴 Ne permet qu'une inclinaison limitée. |
| 🔴 Vitesse relativement lente | 🟢 Le balayage peut être très rapide |
| 🟢 Enlève les débris et le liquide réfrigérant indésirable | 🔴 Mesure tout (utile et inutile) |

A partir du tableau 1.5 on constate que chaque méthode possède des avantages et des inconvénients et par conséquent le choix de chaque méthode doit se faire d'une manière judicieuse.

### 1.5. Traitement des surfaces optiques :

Les procédés de finition par abrasion sont des procédés de fabrication utilisés pour produire des surfaces ayant des caractéristiques souhaitées avec un taux adéquat de génération de surface. Ils fonctionnent avec des abrasifs résistants à l'usure dans le processus de génération de surface. Souvent, ces procédés sont décrits comme des «méthodes de finition utilisant des arêtes de coupe planes».

L'origine de ces méthodes de transformation date de la fabrication de l'outil à l'âge primordial. Ils ont été hérités et développés de génération en génération à un niveau de technologie de pointe. La classification des techniques de polissage et de rodage par génération est représentée sur le tableau 1.6 (Kasai T. 4 1995). Actuellement, la technologie de traitement qui appartient à la quatrième génération, une version améliorée de la technologie de troisième génération, a été appliquée à la fabrication de dispositifs optiques, électroniques et mécaniques.

***Tableau 1.6 :*** *Classification des techniques de polissage et de rodage par génération*

| **Générations** | | **Propriétés** | **Applications** |
|---|---|---|---|
| 1ère | | Finition matte | Outils en pierre |
| 2ème | | Finition miroir | Perles, Miroirs en bronze |
| 3ème | | Précisions | Lentille optique, miroir prismatique |
| 4ème | 01 | Polissage de précision sans endommagement | Plaquette de filtre en quartz, Si wafer, GaAs wafer, barreau laser, miroir |
| | 02 | Machine-outil automatique | Production de masse pour lentille, Si wafer, Photomask plaque de verre, Disque de mémoire magnétique |
| | 03 | Fabrication optique assistée par ordinateur | Lentille a grande dimension, optique de rayon X, Matrice optique. |

### 1.6. Typologie des procédés avec abrasifs libres :

Dans le processus d'usinage par des abrasifs, il existe les abrasifs libres et fixes. Le rodage et le polissage sont considérés comme des procédés d'usinage par des abrasifs, qui utilisent des forces de frottement entre la surface de la pièce et l'outil, la suspension des grains est constamment introduite dans l'outil pendant ce processus.

Le rodage est un procédé d'usinage par des abrasifs libres qui utilise des grains abrasifs en suspension dans une huile ou un milieu aqueux en fonction du matériau fini. Un abrasif fin est appliqué, en continu ou à des intervalles spécifiques, sur une surface de travail pour former un film abrasif entre la plaque de rodage et les pièces à roder. Chaque grain abrasif utilisé pour le rodage a des formes irrégulières tranchantes. Et lorsqu'un mouvement relatif est induit et que la pression est appliquée (au moyen d'une charge positionnée au-dessus de la pièce ou de l'outil), les bords tranchants des grains sont forcés dans le matériau de la pièce à usiner. Chaque grain abrasive libre qui est en contact avec la surface de la pièce agit comme un outil de coupe microscopique qui soit fait une indentation ou provoque l'enlèvement de matière à de très petite échelle comme le montre la figure 1.11.

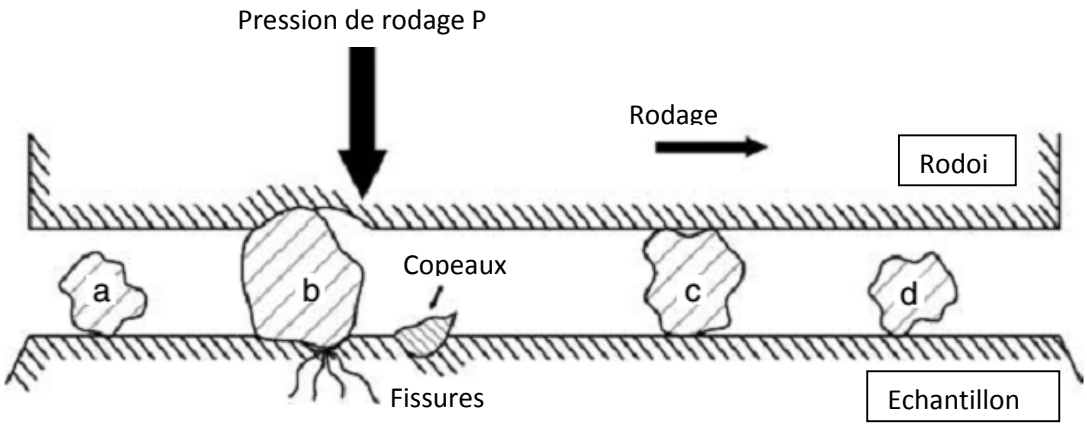



***Figure 1.11 :*** *Modèle du procédé de rodage des matériaux durs et fragiles (Ioan D. Marinescu et al. 2007).*

Même si les grains abrasifs sont irréguliers en taille et en forme, ils sont utilisés en grandes quantités et donc une action de coupe à lieu en continu sur toute la surface de contact. La profondeur des marques et des rayures déterminera la rugosité de la surface, qui est habituellement mesurée avec un analyseur de surface et décrite en termes de paramètres tels que Ra, Rt en µm. Plus les grains abrasifs sont grands et durs, plus la surface sera rugueuse. A l'inverse, plus les grains abrasifs sont fins, plus la surface sera lisse. Il existe souvent une

limite à la régularité de surface qui peut être obtenue par rodage, même lorsque les grains abrasifs utilisés sont très fins.

Les procédés abrasifs ont un grand nombre de paramètres qui peuvent être modifiés afin d'obtenir la qualité de surface souhaitée. Le processus de rodage est influencé par la charge, la vitesse de rotation et le matériau du rodoir, le temps de rodage, le type de suspension utilisée (suspension de diamant monocristallin ou polycristallin), la granulométrie de l'abrasif, le débit, la concentration de la suspension, etc. Il est presque impossible de faire varier tous les paramètres qui influencent le processus de rodage ; une solution consiste à limiter le nombre de variables et ainsi réduire le champ de la recherche.

Les domaines les plus importants de la recherche d'optimisation de rodage ont été axés sur :

- Qualité de surface
- Précision dans la forme et les dimensions de la pièce (planéité dans le cas des pièces planes et sphéricité dans le cas de pièces sphériques etc.)
- Taux d'enlèvement de matière (MRR)
- Le comportement des différents types de suspensions de diamant

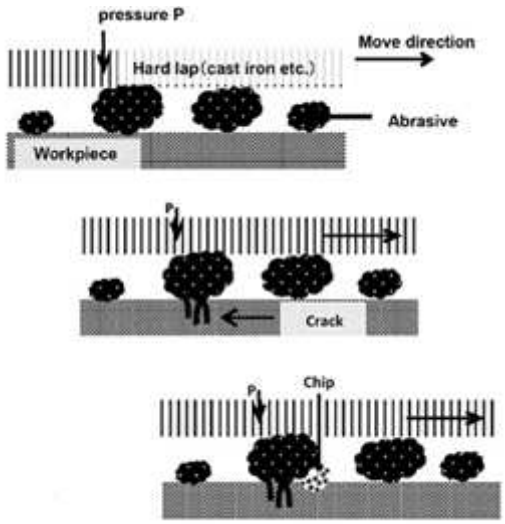
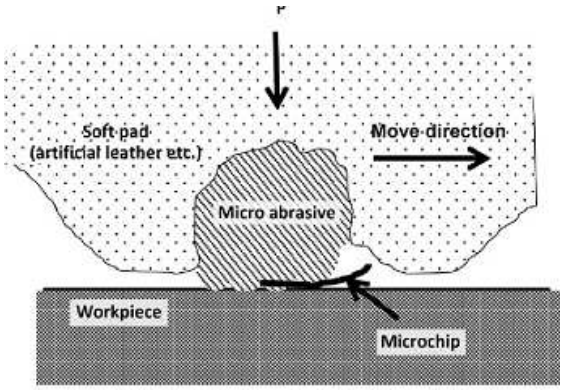
Les principaux objectifs de cette recherche sont les suivants :

- Etudier la corrélation entre les paramètres qui influence la qualité de la pièce (rugosité de surface et la couche fissurée SSD)
- Optimisation des paramètres de coupe (rotation de la plaque de rodage, charge, temps de rodage, etc.)

### 1.7. Procédés d'usinage avec des abrasifs libres :

La principale différence entre les processus de rodage et de polissage est évidente dans la fabrication des verres. Le rodage produit une surface rugueuse traitée avec des abrasifs grossiers et un outil dur, tandis que le polissage produit une surface miroir traitée avec des abrasifs fins et un outil avec une surface douce. Le tableau 1.7 montre la différence entre le processus de rodage et de polissage.

***Tableau 1.7 :*** *Différence entre le processus de rodage et de polissage (Ioan D. Marinescu et al. 2015).*

| Rodage | | Polissage |
|---|---|---|
|  | |  |
| **Taille des abrasifs** | Large | Microscopique |
| **Porte abrasifs** | Disque en (fonte, céramique, etc.) | Polissoir lisse en (cuir artificiel, polyuréthane, etc.) |
| **Action des abrasifs** | Roulant | Retenue élastiquement par la surface du polissoir. |
| **Qualité de surface** | Surface rugueuse | Surface miroir |
| **Objectif principal** | Précision de la forme | Surface miroir lisse |

La figure 1.12 montre la relation entre le rodage et le polissage. Chacun est basé sur une combinaison différente d'abrasifs et de porte abrasifs. Toutefois, selon le type de matériau de la pièce, le choix des abrasifs et des portes abrasifs n'est pas fixe. Par conséquent, l'aspect de finition des surfaces peut varier. En fait, les définitions de rodage et de polissage sont quelque peu similaires.

Les techniques de rodage et de polissage présentent les caractéristiques suivantes :

- Le processus est facile à réaliser, à travers les mouvements relatifs de la pièce coulissante contre le rodoir/polissoir, en utilisant des suspensions de grains abrasifs.

- Presque tous les matériaux solides, tels que les métaux et les matériaux non métalliques, peuvent être traités.
- Un rendement faible, car le processus se fait avec les micros action des grains abrasifs, ce qui procure un grand avantage pour un traitement de haute précision.
- Une machine de traitement très sophistiquée n'est pas nécessaire.
- Le contrôle de la suspension des grains abrasifs est compliqué en raison de certains problèmes tels que les éclaboussures et l'accumulation de copeaux.

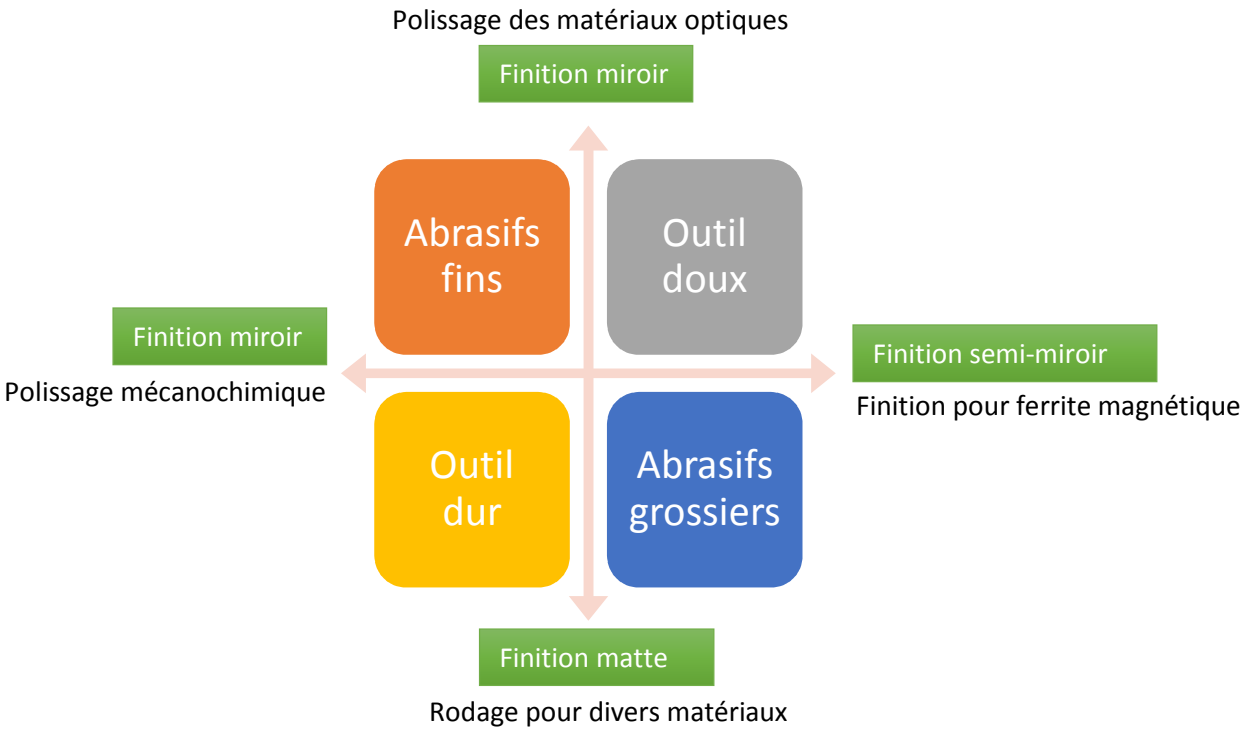



***Figure 1.12 :*** *Classification du rodage et du polissage sur la base de combinaisons d'outils et abrasifs (Kasai T et al. 1989)*

La figure 1.13 indique le positionnement relatif du rodage, polissage et le polissage à ultra-précision pour la fabrication de matériaux durs et fragile (Kasai T. 6. 1984). L'axe horizontal fournit une échelle pour indiquer les unités de traitement (c'est-à-dire la profondeur par abrasifs, la taille des copeaux, la rugosité de surface, etc.). L'axe vertical représente la rugosité de surface (Rz) obtenue par chaque traitement. L'unité minimale du polissage ultraprecision est indiquée dans l'ordre d'un atome (Taniguchi N. 1993).

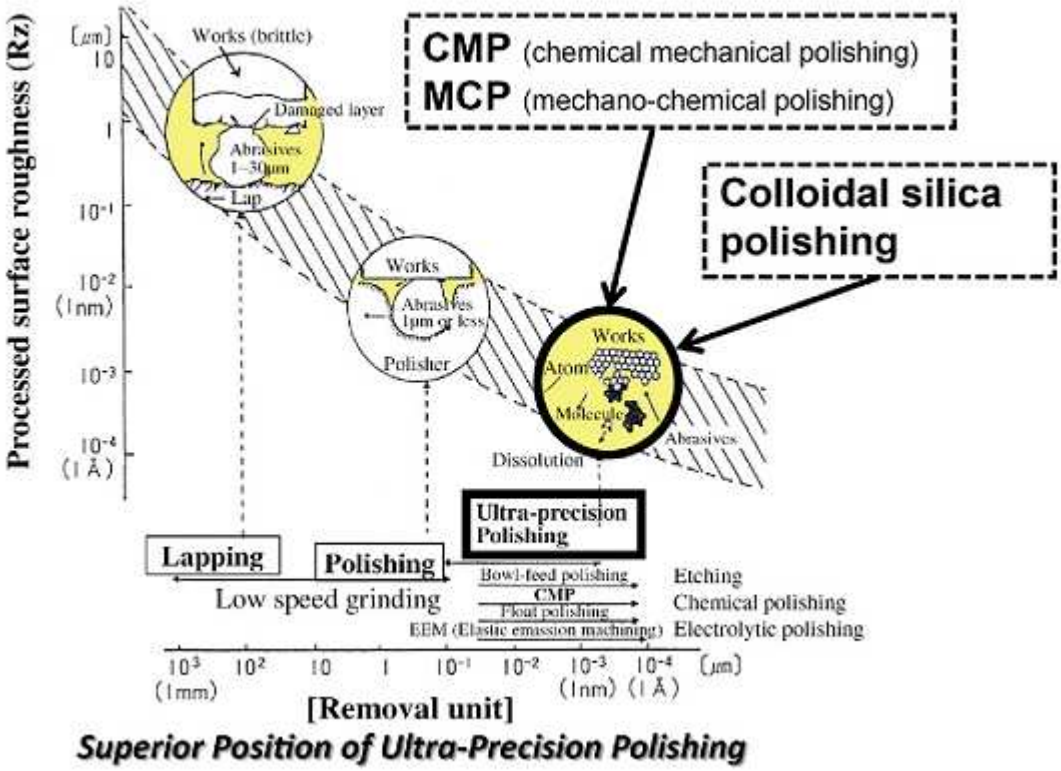



***Figure 1.13 :*** *Modèles de rodage, polissage et polissage ultra-précis pour les matériaux durs et fragiles (Kasai T. 6. 1984)*

### 1.8. Processus de rodage :

Le rodage est une opération d'enlèvement de matière lente, son but est d'enlever la matière, modifier la forme et diminuer la rugosité de surface initiale. Il est utilisé moins pour la finition et plus pour la précision de la forme, comme la planéité dans le cas d'objets plats ou sphéricité dans le cas des lentilles sphériques. En revanche, le terme polissage implique une meilleure finition avec peu d'attention pour la précision de la forme (Lucca D.A. et al. 1998). Dans la fabrication en série des verres optiques, le rodage est une étape prémordiale dans le processus de fabrication sont principe est illustré dans la figure 1.14. Les principaux facteurs influençant les caractéristiques de rodage sont le type du rodoir, le type et la taille des grains abrasifs et le type du liquide de rodage (Stachowiak G.B. & Stachowiak G.W. 2001).

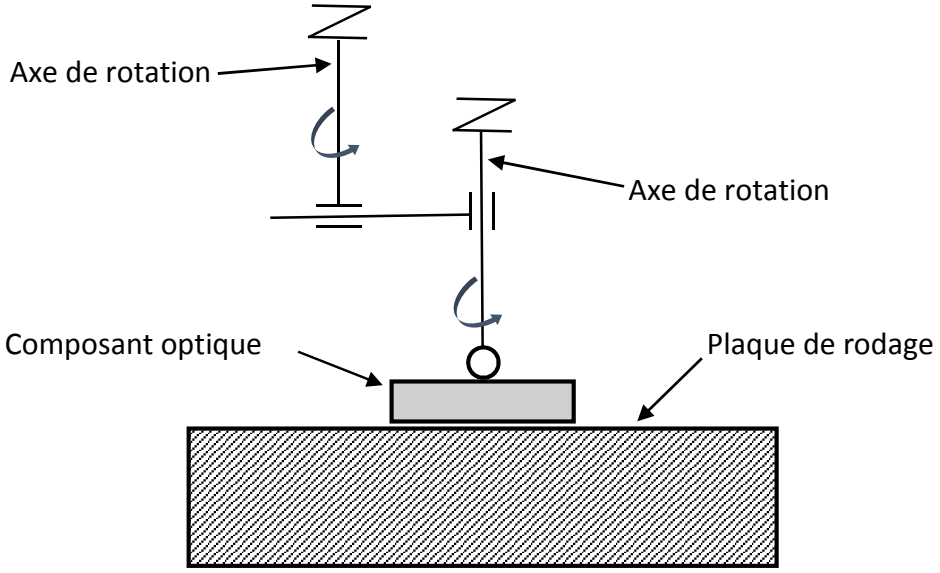



***Figure 1.14 :*** *schéma de principe de rodage*

### 1.8.1. Rodoir :

Le matériau du rodoir est important car une pièce peut être gravement rayée et endommagé par des abrasifs si la plaque de rodage est trop dure (Inamura T. 1998). La composition de la plaque de rodage est d'une grande importance car elle peut affecter les résultats du procédé de rodage. Une plaque de rodage dure résiste à l'enfoncement des grains abrasifs. Par conséquent, les grains roulent plus que de glisser de sorte que la majeure partie de l'enlèvement de matière est par microfracture induite par des contraintes. En outre, les grains sont plus susceptibles d'être incorporés dans la pièce. Une plaque de rodage plus souple permet à des abrasifs de s'emboîter partiellement dans cette derniere, ce qui entraîne un déplacement plus glissant et un enlèvement de matière par arrachement. Le résultat est une surface plus fine mais moins de planéité. Pour obtenir une meilleure qualité de surface en fonction de la planéité, le rodage moderne utilise souvent un disque dur et des grains abrasifs très fin.

Pour produire une surface plane, il est important que la suspension des grains abrasifs soit distribuée uniformément entre la pièce et la plaque de rodage. Il y a une tendance à l'accumulation des grains abrasifs dans certaines régions, ce qui augmente la pression locale et, par conséquent, augmente le taux d'enlèvement dans ces zones (Fang et al. 1998).

Une grande variété de rodoir est accessible pour presque n'importe quelle application : fonte (pour l'ingénierie générale), céramique (pour les céramiques et autres matériaux durs), verre

(pour les matériaux électro-optiques), aluminium / acier inoxydable, et bien d'autres, (Figure 1.15).

Les rodoirs rainurés sont idéales pour la surface plane même avec de grandes superficies. Pour le rodage cylindrique, on préfère des plaques sans rainures.

***Figure 1.15 :*** *Différents types de rodoir.*

### 1.8.2. Grains abrasifs :

Dans le rodage, les abrasifs $Al_2O_3$ et SiC sont généralement utilisés en raison de leur faible coût et de leur distribution stable. Pour une utilisation efficace de la taille des grains abrasifs pendant le traitement des lentilles optiques ou des prismes, le nombre de la taille des grains abrasifs est doublé à chaque pas pour obtenir finalement la rugosité de surface souhaitée à travers la pièce à usiner. Bien qu'aucune explication claire ne soit fournie pour ce processus, il semble que ces conditions de rodage sont empiriques. Les irrégularités de surface et des couches endommagées formées lors de l'étape de rodage peuvent être complètement enlevés pour produire la forme et la taille exacte souhaitée. Dans ces conditions, le doublement du

nombre de tailles à chaque pas peut également être appliqué au rodage des matériaux céramiques.

La finition par abrasion magnétique a récemment été proposée comme nouvelle méthode de rodage. Les abrasifs magnétiques, en matériau ferromagnétique et les poudres abrasives frittées / broyées, interagissent avec le champ magnétique de la pièce, nécessitant par conséquent une machine spécialement conçue pour le traitement (Shinmura T. & Aizawa T. 1992).

Les abrasifs sont soit naturels (diamant, corindon, émeri, grenat, quartz), soit artificiellement cristallins (diamant, carbure de silicium, oxyde d'aluminium, nitrure de bore cubique, carbure de bore, etc.). La deuxième catégorie peut être divisée en deux groupes:

- Abrasifs fondus qui sont le résultat de très hautes températures qui produisent des cristaux durs.
- Les abrasifs non fondus qui sont le résultat de températures plus basses et d'additifs chimiques.

Les abrasifs non fondus ne sont pas aussi durs que les abrasifs fondus.

Le tableau 1.8 représente la classification des grains abrasifs selon l'échelle Mohs de dureté

***Tableau 1.8 :*** *Echelle Mohs de dureté*

| **Grain abrasif** | **Echelle de Mohs** |
|---|---|
| diamant | 10.0 |
| Nitrure de bore cubique (Borazon CBN) | 9,9 |
| Carbure de silicium | 9,5 |
| Oxyde d'aluminium | 9,0 |
| Oxyde d'aluminium blanc 38A | 9,0 |
| Corindon | 9.0 |
| Oxide de chromium | 8,5 |
| Garnet | 8-9.0 |
| Quartz | 7.0 |

### 1.8.3. Liquide de rodage :

Les grains abrasifs sont transportés vers la zone de rodage en suspension dans un milieu huileux ou aqueux dans le but d'obtenir une répartition continue et uniforme sur le rodoir. Ce support liquide est disponible en diverses viscosités pour couvrir presque toutes les exigences du procédé. La fonction de support est de lubrifier les deux surfaces. La lubrification est nécessaire pour réduire le frottement entre l'abrasif et la pièce, aider à disperser uniformément le produit abrasif sur la plaque de recouvrement et à retirer les débris abrasés de la zone de travail. La caractéristique la plus importante du support est sans doute sa capacité à suspendre et disperser uniformément les particules abrasives dans toute l'interface entre la pièce et le rodoir.

## 1.9. 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, parceque des grains abrasifs très fins et des polissoirs souple sont adoptés.

Dans le polissage du verre, on utilise des abrasifs à base d'oxyde métallique fin, tels que la poudre d'oxyde de cérium ($CeO_2$) et la poudre d'oxyde de fer ($Fe_2O_3$) de moins de 1 µm, ainsi que des polissoirs souples tels que le polyuréthane, la cire, le plastique et le cuir synthétique.

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. Les principaux facteurs influencent les caractéristique de polissage sont les suivants :

### 1.9.1. Abrasifs pour polissage :

Les abrasifs contenus dans la suspension de polissage sont des poudres fines d'oxyde métallique telles que : $CeO_2$, $Fe_2O_3$, $Al_2O_3$ et $SiO_2$. Ces substances sont généralement utilisées en suspension dans l'eau. La dureté de ces abrasifs est l'un des critères de sélection. Cependant, parce que les valeurs sont obtenues à partir de monocristaux ou de matériaux frittés, elles ne représentent pas la valeur des abrasifs eux-mêmes. Il semble que des réactions chimiques assez compliquées se produisent avec la suspension.

Dans le polissage du verre, par exemple, la poudre de $CeO_2$ est supérieure à d'autres en termes d'enlèvement de matière. D'autre part, le $Fe_2O_3$ est nettement meilleur en qualité de surface, et la poudre de $SiO_2$ pure est excellente pour éviter la contamination des éléments de transition.

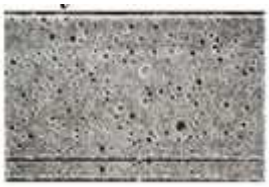
Les poudres de diamant sont les matériaux abrasifs les plus durs allant de sous-µm à 4 µm. Ces poudres sont utilisées pour le polissage sous la forme d'une pastille ou en suspension dans l'eau ou l'huile. Ils sont assez chers, donc la quantité introduite est contrôlée afin de minimiser la consommation.

### 1.9.2. Polissoir :

Les polissoirs en polyuréthane sont utilisés actuellement pour la fabrication de lentilles optiques en raison de leurs faibles usures et d'une utilisation simple. Il est essentiel que la surface du polissoir soit poreuse afin de permettre aux grains abrasifs de s'incruster dans sa surface, le tableau 1.9 montre des images MEB de la surface de quelques types de polissoirs.

L'usure du polissoir peut provoquer une détérioration de la précision géométrique, comme la planéité et la génération de bords rabattus. La bonne sélection d'une machine de polissage et son fonctionnement est important pour satisfaire les exigences de polissage de haute précision.

***Tableau 1.9 :*** *Images MEB des différentes polissoires*

| **Type de polissoire** | **Application** |
|---|---|
|  Polyryuthane | Relativement durs, adaptés aux couches diélectriques, formation de rainure, bonne planéité |
| Textile non tissé | Relativement doux, adapté pour les métaux, difficile à endommager, bonne uniformité |
| Double couche empilée | Bonne planéité et uniformité (par exemple, IC1400®) |
| cuir artificiel | Doux, surface lisse de haute qualité, ne convient pas pour la planétisation, adapté pour la finition des plaquettes de silicium |

### 1.10. Finition magnéto-rhéologique *(Magnetorheological Finishing MRF)* :

Le procédé de finition magnétorhéologique (MRF) fournit un nouveau moyen, efficace et innovant de finition des matériaux optiques ainsi que de nombreux métaux à un niveau de précision souhaité. MRF est utilisé avec succès pour le polissage des lentilles sphériques ou asphériques, des miroirs, etc (Laxmi N. Pattanaik & Himanshu Agarwal 2014). L'évolution du processus MRF d'une installation de laboratoire à une machine commerciale entièrement automatisée est rapportée par Harris (Harris D. C. 2011). Le procédé MRF utilise un fluide magnétorhéologique (MR), constitué d'abrasifs de polissage non magnétiques, de particules magnétiques de carbonyle (CIP), de liquide porteur et de certains additifs. La figure 1.16

montre un diagramme schématique d'un procédé MRF pour la finition de composants optiques petits et symétriques axialement. Des composants plus complexes (de forme libre) ou avec des dimensions très grandes sont usinés par une autre configuration de la machine MRF où la pièce est fixée sur la table et l'outil est située au-dessus.

Le fluide MR est pompé depuis le conditionneur de fluide jusqu'à la buse, la rotation de la roue traine le fluide sous la pièce à usiner ,ensuite le fluide MR est pompé vers le conditionneur, La principale partie est la région à l'intérieure du champ magnétique ou se produit l'enlèvement de la matière cette action crée des forces de cisaillements importantes par l'interaction entre la roue, le fluide MR et la surface tandis que le fluide s'écoule entre la roue et la surface optique. Le polissage est réalisé en faisant tourner la pièce (lentille) sur une broche à une vitesse constante et en la balayant autour de son rayon de courbure à travers la zone de finition créée par le fluide MR.

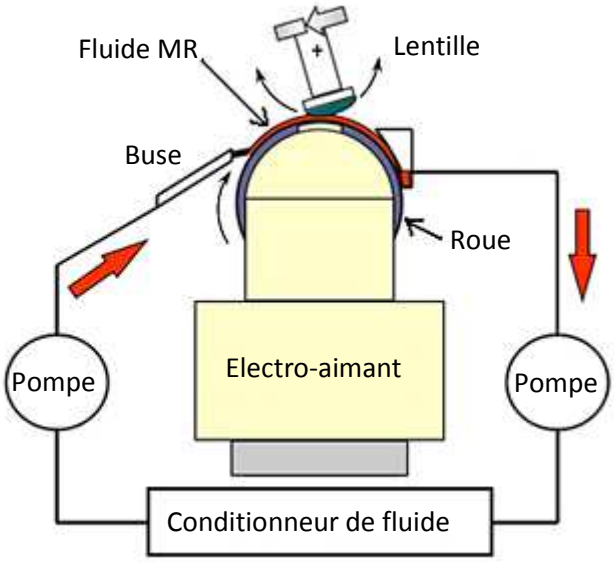



***Figure 1.16 :*** *Diagramme schématique du procédé MRF (Sidpara 2014)*

### 1.10.1. Application du processus MRF :

Les applications de processus MRF ont un large spectre en raison de leurs avantages uniques. MRF a été utilisé pour la finition de presque tous les types de verres et de céramiques. L'une des applications difficiles dans lesquelles la MRF peut être un choix viable est la fabrication de miroirs à grande échelle. Ces miroirs sont en Si, SiC, Zerodur®, silice fondue, Cu à couche de Ni électrolytique, GlidCop (alliage de cuivre renforcé par l'oxyde d'aluminium), Mo, etc. Généralement, la longueur de ces miroirs est de 1 m ou plus, alors que la largeur est de ~ 50 à

75 mm. Tandis que le rayon est en kilomètres, Différentes formes de miroir, telles que cylindrique, elliptique, et toroïdal, sont généralement utilisés. L'erreur en microradian et la rugosité de surface en quelques Å sont les conditions principales pour une bonne focalisation ainsi que la réflectivité du faisceau de rayons. En outre, de tels miroirs ont besoin d'une excellente microrugosité, non seulement pour éviter une perte de photons par dispersion, mais également pour empêcher le miroir d'être chauffé et finalement endommagé (Siewert F. 2013).

## 1.11.Références bibliographiques

Arvinth Davinci M., Parthasarathi N.L., Utpal Borah & Shaju K. Albert. 2014. Effect of the tracing speed and span on roughness parameters determined by stylus type equipment. Measurement 48.

Brodeman R. 1986. Roughness Form and Waviness Measurement by Means of Light Scattering. Prec. Eng. 8.221-26.

Elmas S., Islam N., Jackson M.R. & Parkin R.M. 2011. Analysis of profile measurement techniques employed to surfaces planed by an active machining system. Measurement 44.365-77.

Fang, L., Q. Zhou & Q. Li. 1998. An experimental simulation of cutting wear in three-body abrasion. Wear 219.188–94.

Harris D. C. 2011. History of magnetorheological finishing. Proc. SPIE 8016, 80160N

Hicks T. R. & Atherton P. D. 2000. The micropositioning book London: Penton Press.

Inamura T. 1998. Computer simulation of microcutting. Int. J. Jpn. Soc. Prec. Eng. 32.239–45.

Ioan D. Marinescu, Eckart Uhlmann & Toshiro K. Doi. 2007. Handbook of Lapping and Polishing: Taylor & Francis Group, LLC.

Ioan D. Marinescu, Toshiro K. Doi & Eckart Uhlmann. 2015. Handbook of Ceramics Grinding and Polishing: Elsevier Inc.

Kasai T, Horio K & Doy KT. 1989. Lapping and polishing characteristics of soft material tool use, sensors and materials. MY 2.301–12.

Kasai T. 4. 1995. Ultraprecision polishing, Foundation, Ultraprecision Manufacturing Technology (in Japanese). Fuji-technosystem Ltd.266.

Kasai T. 6. 1984. Lapping and Polishing, Ultraprecision Machining Technology, Kumagaya Memorial Committee Meeting. Japan Society of Grinding Engineers (in Japanese); .451.

Laxmi N. Pattanaik & Himanshu Agarwal. 2014. Development of Magnetorheological Finishing (MRF) Process for Freeform Surfaces. International Journal of Advanced Mechanical Engineering 4.611-18.

Lucca D.A., Brinksmeierm E. & Goch G. 1998. Progress in assessing surface and subsurface integrity. Ann. CIRP 47.669-93.

Marioge J. P. 1993. Etat de surface : défauts locaus et rugosité. J. Optics 24.177-92.

—. 2000a. Surface optique : modélisation des défauts et contrôle. Techniques de l'ingénieur Doc E4050v2.

—. 2000b. Surfaces optiques. EDP science.

Raphet Bernard. 2006. États de surface : Mesure. Techniques de l'Ingénieur Doc R 1231.

—. 2008. États de surface : Caractérisation. Techniques de l'ingénieur Doc R1230.

Shinmura T. & Aizawa T. 1992. Study on a new finishing process of fine ceramic by magnetic abrasive machining development of diamond magnetic abrasives and its finishing performances (in Japanese). J Jpn Soc Grind Eng 36.90–98.

Sidpara, Ajay. 2014. Magnetorheological finishing: a perfect solution to nanofinishing requirements. Optical Engineering 53.092002.

Siewert F. 2013. Metrology, mirrors and gratings—advances and challenges in synchrotron optics,. J. Phys. Conf. Ser. 425.152001.

Stachowiak G.B. & Stachowiak G.W. 2001. The effects of particle characteristics on three-body abrasive wear. Wear 249.201–07.

Taniguchi N. 1993. The state of the art of nanotechnology for processing of ultraprecision and ultra fine products. ASPE distinguished lecture. Prec Eng. 16.5–24.

Whitehouse David. 2002. surfaces and their measurment. London: Hermes Penton science.

—. 2003. Handbook of Surface and Nanometrology.: Institute of Physics Publishing.

Williamson J. B. P. 1967. The microtopography of solid surfaces. Proc. IMechE, .

# II Meulage assisté par Ultrasons

“ La chance ne sourit qu'aux esprits bien préparés “

*Louis Pasteur*

*(*1822 - 1895*)*

## 2. Meulage assisté par ultrasons :

### 2.1. Introduction :

L'application de l'énergie ultrasonore pour l'enlèvement de matière a été introduite en 1927 par Wood et Loomis. Ils ont appliqués une haute fréquence (environ 70 KHz) sur un barreau de verre pour enlever de la matière sur un substrat de verre en utilisant des grains abrasifs au cours du traitement de la surface, ils ont constatés qu'il était possible de percer des trous dans le substrat de verre (Wood E.W. & Alfred L. Loomis 1927).

Les mécanismes d'enlèvement de la matière qui incluent le martelage, l'abrasion et l'enfonçage, sont représentés sur la figure 2.1(a). La profondeur de pénétration est limitée par les grains abrasifs en suspension qui peuvent entrer dans le trou. Prabhakar et al (Prabhakar D. et al. 1992), ont utilisés des grains abrasifs fixés sur l'outil pour l'enlèvement de la matière, c'est un mode d'enlèvement de matière, dans lequel aucun roulement libre de grains abrasifs n'est impliqué ; ainsi, l'effet de l'extraction de la matière est renforcé en raison du couplage des grains abrasifs et de l'outil, comme le montre la figure 2.1(b).

Dans ces circonstances, il semble que le moyen le plus simple et le plus rapide pour augmenter l'efficacité du meulage assisté par ultrasonique commence par l'amélioration de la conception de l'outil.

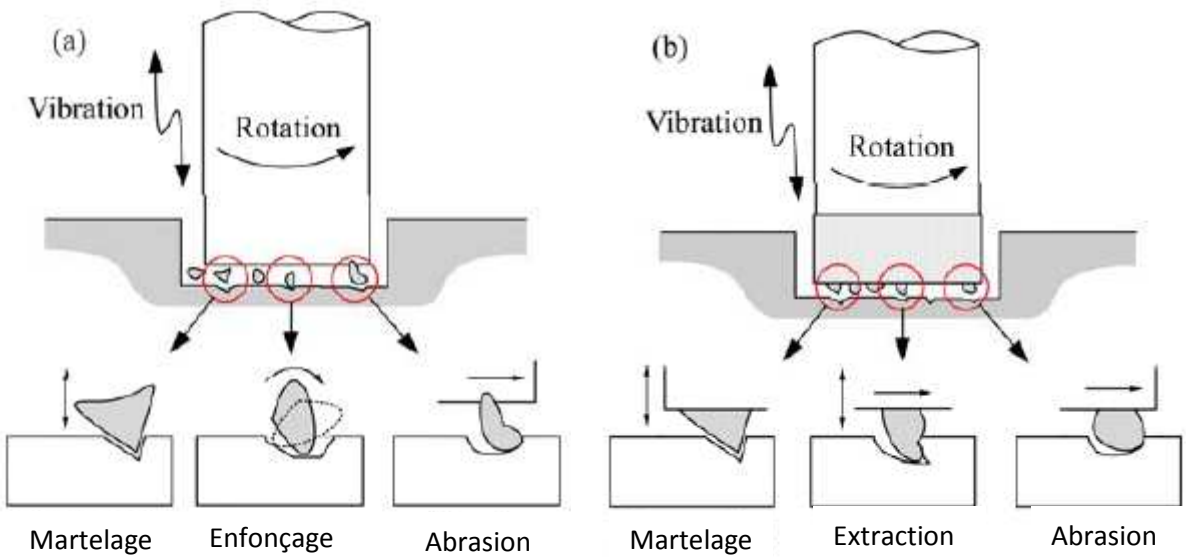



***Figure 2.1 :*** *Mode d'enlèvement de la matière : (a) grains abrasifs libres ; (b) grains abrasifs fixes (KUO Kei-lin & TSAO Chung-chen 2012)*

### 2.2. Principe cinématique :

Dans le meulage par assistance ultrasonique, l'outil avec des abrasifs en diamant tourne et avance le long de la surface de la pièce à une vitesse constante tandis qu'il oscille longitudinalement dans sa direction axiale. Cette oscillation change sa direction en une amplitude A, sinusoïdale par rapport au temps, avec une fréquence ultrasonique f.

Si la vitesse d'avance de l'outil diamanté est négligée, la trajectoire de chaque abrasif situé sur la face extrême de l'outil pourrait être exprimée comme suit :

$$z = A\sin(2f(x/\omega r) + \phi) \qquad (2.1)$$

Avec A comme amplitude de la vibration ultrasonique ; r rayon de rotation de l'outil ; ω vitesse de rotation ; x déplacement tangentiel du grain abrasif ; ϕ phase initiale de la rotation et f fréquence ultrasonique. Selon l'équation précédente. La figure 2.2 montre la trajectoire d'un grain abrasif avec et sans assistance ultrasonique contre son déplacement tangentiel dans un cycle ultrasonique vibrationnel.

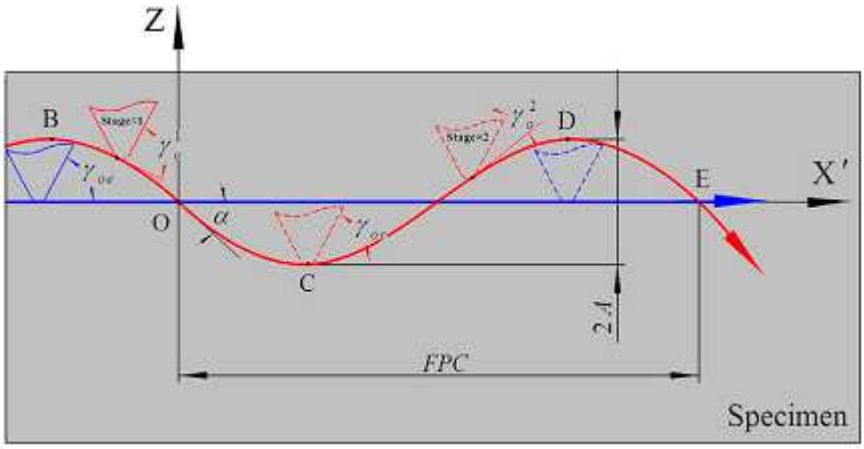



***Figure 2.2 :*** *Trajectoire d'un grain abrasif produite avec et sans assistance ultrasonique (Dongxi Lv et al. 2013).*

La variation périodique de la trajectoire du grain abrasif est due à la fluctuation périodique de sa vitesse instantanée. Au point O, le grain abrasif pénètre dans la matière avec une vitesse constante $Vmax$ et un angle d'engagement α présentés respectivement par les équations (2.2) et (2.3).

$$Vmax = \sqrt{4\pi^2 f^2 A^2 \left(2\pi f \left(\frac{X'}{\omega r}\right)\right) + \omega^2 r^2} \qquad (2.2)$$

$$\alpha = -\arctan\left(\frac{dV}{dx'}\right) \quad (2.3)$$

Ces deux paramètres sont combinés pour caractériser qualitativement l'effet de l'impact du grain abrasif sur la surface de la pièce. Cependant, la combinaison de ces deux paramètres ne peut pas décrire l'effet ultrasonique quantitativement et ne peut pas, également corréler avec les effets des conditions d'usinage. Afin de surmonter ces difficultés et pour des propriétés vibrationnelles ultrasoniques spécifiques (à savoir la fréquence et l'amplitude), un paramètre non dimensionnel K a été proposé qui est exprimé comme suit :

$$K = \frac{FPC}{2A} \ (0 < k > +\infty) \quad (2.4)$$

FPC = $\pi$nr / 60f (vitesse de déplacement par cycle) est le déplacement tangentiel du grain abrasif dans chaque période ultrasonique de vibration et n = vitesse de rotation de l'outil diamanté.

### 2.3. Meulage avec le régime ductile :

L'hypothèse de meulage avec le régime ductile de Bifano et al, (Bifano T. G. et al. 1991) stipule que, pour toutes matières, si l'échelle dimensionnelle d'enlèvement de matière est assez petite, la déformation plastique du matériau aura lieu sans fractures. Sous certaines conditions d'usinage, il est possible d'usiner des matériaux fragiles comme la céramique, les verres etc. à l'aide d'outils diamantés de sorte que la matière est enlevée par déformation plastique, laissant une surface sans fissures. Ce processus est appelé régime ductile.

Dans le mode ductile, l'énergie est transférée à une déformation permanente du matériau de la pièce en revanche, dans le mode fragile, l'énergie d'usinage est transférée à un processus de fracture.

#### 2.3.1. Principe du meulage avec le régime ductile :

La transition du mode fragile en en mode ductile lors de l'usinage des matériaux fragiles a été décrite en terme d'équilibre d'énergie entre l'énergie de déformation et l'énergie de surface.

La profondeur de pénétration critique $d_c$ pour l'initiation de fracture est décrite comme suit :

$$d_c = b\left(\frac{k_c}{H}\right)^2\left(\frac{E}{H}\right) \quad (2.5)$$

Avec $K_c$ la ténacité, $H$ la dureté, $E$ le module d'élasticité, et $b$ est un constant qui dépend de la géométrie de l'outil.

Comme le montre la figure 2.3, l'épaisseur de copeau non déformée se présente sous la forme d'un épaulement d'épaisseur variable en raison du rayon de bout de l'outil. La rupture fragile se produit lorsque l'épaisseur de copeau non déformée atteint la valeur critique dans la région de l'épaule. Selon le concept de l'équilibre de l'énergie, l'endommagement due aux fractures s'initie à la profondeur de coupe effective et se propage à une profondeur moyenne $y_c$. Si l'endommagement ne se poursuit pas au-dessous du plan de la surface de coupe, les conditions pour avoir un régime ductile sont obtenues.

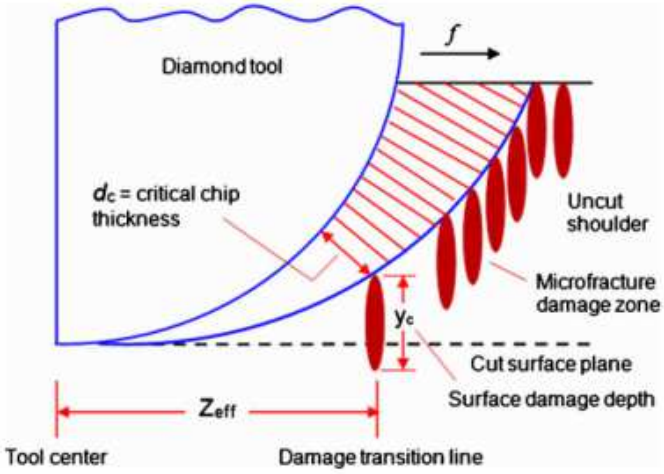



***Figure 2.3 :*** *Projection de l'outil perpendiculaire à la direction de coupe (Muhammad Arif et al. 2012).*

Une autre interprétation des phénomènes de transition ductile est basée sur le clivage dû à la présence de défauts. Les valeurs critiques de clivage et de déformation plastique sont affectées par la densité des défauts ou des dislocations dans le matériau. Etant donné que la densité des défauts n'est pas si grande dans les matériaux fragiles, la valeur critique de fracture dépend de l'importance du champ de contrainte donc de profondeur de coupe comme il a été représenté par la figure 2.4 qui illustre un modèle d'enlèvement de copeaux avec petite et grande profondeur de coupe. Lorsque la profondeur de coupe est petite, la taille du champ de contrainte critique est faible afin d'éviter un clivage. Par conséquent, une transition dans le processus d'enlèvement de matière du mode fragile au mode ductile peut avoir lieu en fonction de la profondeur de coupe.

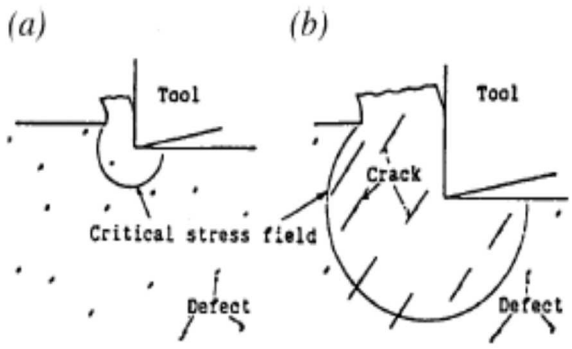



***Figure 2.4 :*** *modèle d'enlèvement de copeaux avec (a) petite et (b) grande profondeur de coupe (Muhammad Arif et al. 2012).*

## 2.4. Usinage par ultrasons de la Céramique

Les composants céramiques rencontrent fréquemment les plus hautes exigences de garantie à long terme de propriétés fonctionnelles. Malheureusement, les coûts de production sont si élevés que ces matériaux ne sont pas encore totalement acceptés. Une grande partie de ces coûts survient dans les procédés d'usinage conventionnels comme, le meulage, le doucissage et le polissage. En outre, il n'y a toujours pas de stratégies adéquates pour un usinage précis et économique de géométries complexes telles que des perçages, des rainures, des surfaces sphériques ou des formes libres (Uhlmann E. & Spur G. 1998). Le meulage ultrasonique et l'usinage par décharge électrique (EDM) sont appropriés pour la production de ces géométries flexibles, mais présentent certains inconvénients importants. Bien que seuls les matériaux conducteurs puissent être usinés avec EDM, le faible taux d'enlèvement de matière, l'usure de l'outil, et la plupart du temps une précision insuffisante impose des limites à l'usinage ultrasonique. Par conséquent, les technologies de fabrication adéquates pour l'usinage de haute précision et économique de matériaux céramiques ont été étudiées et optimisée au cours de ces dernières années.

### 2.4.1. Technologie ultrasonique :

Les vibrations mécaniques ultrasoniques sont générées par la transformation de l'énergie électrique dans des piézo-électrique ou des convertisseurs sonores magnétostrictifs.

Les vibrations longitudinales générées sont des déformations élastiques périodiques du système de vibrations mécaniques dans l'ordre du micromètre à des fréquences supersoniques, qui sont, supérieures à 16 kHz (DIN 1320, 1969). Le système de génération des vibrations ultrasonique se compose , d'un générateur de tension servant à convertir la basse fréquence de la tension d'alimentation en une tension électrique de courant alternatif à haute fréquence, ,d'un

convertisseur ultrasonique, d'un transformateur d'amplitude (sections de transformation), et d'un sonotrode (Spur G. & Krieg G. H. 1995). La figure 2.5 décrit un modèle de système de vibration.

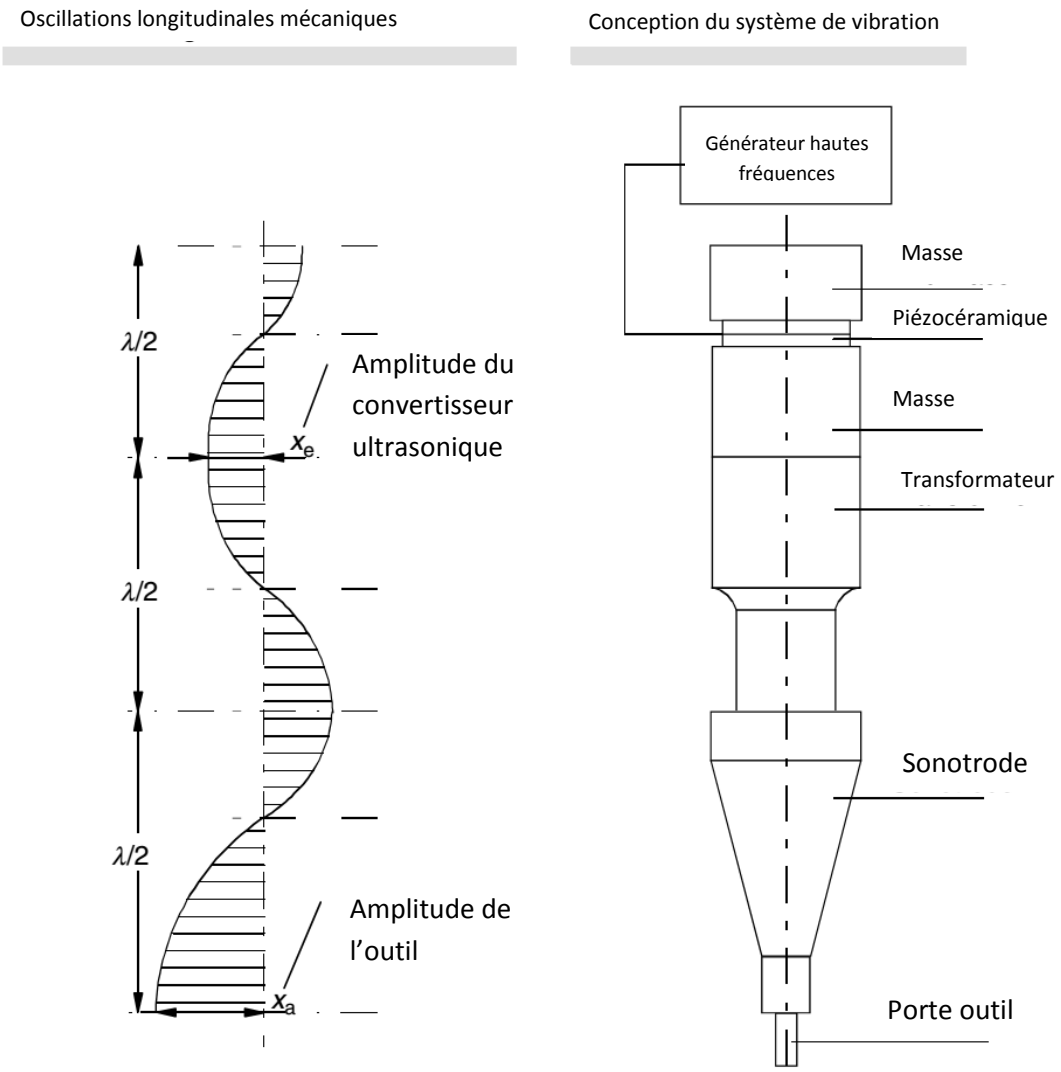



***Figure 2.5 :*** *Modèle de système de vibration*

Le processus de génération des ultrasons et de transformation doit être en grande partie exempt de toutes pertes pour obtenir une grande efficacité du système de vibration. En même temps, il est nécessaire de produire une amplitude de vibration maximale au niveau du convertisseur ultrasonique pour atteindre une amplitude à la surface de la pièce qui correspond à la tâche d'usinage. Principalement une augmentation sans perte d'amplitude est garantie au moyen de la résonance, à savoir une vibration avec une fréquence qui correspond à celle de la fréquence propre du système. Pour une conception constructive du système, ce qui signifie que les

longueurs géométriques des éléments individuels doivent correspondre à la moitié de la longueur d'onde de la vibration ou a un multiple entier.

L'amplitude du convertisseur est généralement trop faible pour l'usinage. Elle peut être portée à une valeur suffisante par le biais d'un transformateur. La sonotrode sert à prendre l'outil et facilite également l'adaptation de résonance à l'ensemble du système de vibration. En outre, il est possible de concevoir la sonotrode de telle manière qu'elle contribue à la réalisation d'un gain d'amplitude supplémentaire (Haas R. 1991).

L'énergie électrique est convertie en vibrations mécaniques dans les machines modernes en utilisant l'effet piézo-électrique. Il concerne la propriété réversible des matériaux céramiques spéciaux qui délivrent une tension électrique lorsqu'ils sont sollicités par des forces extérieures. Cette caractéristique est utilisée pour la génération de vibrations ultrasonores de façon à ce que la tension appliquée est convertie en vibrations mécaniques. Les convertisseurs ultrasoniques modernes contiennent généralement plusieurs disques piézo-céramiques de PZT (Titano-Zirconate de Plomb) limités par deux masses qui sont mécaniquement précontraint par un vissage centré.

## 2.5. Meulage assisté par ultrasons :

### 2.5.1. Fondamental :

Le meulage assisté par ultrason peut être considéré comme un développement technologique de doucissage ultrasonique avec un outil rotatif utilisant des grains abrasifs agglomérés, il représente une alternative économique à ce procédé. Malgré le meulage assisté par ultrason qui a été étudié par un grand nombre de chercheurs, il n’est pas encore clair jusqu’à présent, moins de connaissance existent concernant les paramètres d’usinage, la spécification de l’outil, les travaux expérimentaux, ce procédé a néanmoins déjà été utilisé dans l’industrie.

Les premières investigations de meulage assisté par ultrasons avec des meules à corindon datent de 1956 (Colwell L. 1956). Faire vibrer la pièce à usiner avec une fréquence comprise entre 10 et 18 kHz, ainsi qu'une amplitude de vibration a permis d'obtenir de meilleures rugosités de surface et de réduire la température de traitement pendant le meulage des matériaux en acier. Les recherches scientifiques du procédé au cours des années 1970 ont traitées l'influence de la cinématique de meulage sur le résultat de l'usinage de l'acier (Yano A. et al. 1970) ainsi que de l'application de meules diamantées à l'usinage d'alliages de titane, métaux durs, et aciers alliés (Nerubai M. 1977). Le taux d'enlèvement de matière pourrait être augmenté dans toutes les

investigations existantes par rapport aux procédés d'usinage conventionnel. Le meulage assisté par ultrasons a été utilisé pour l'usinage de matériaux fragiles depuis les années 1970 et 1980 (Uematsu T. et al. 1988). Cependant, des études scientifiques exhaustives de ce processus, n'apparaissent que dans les années 1990 (Prabhakar D. et al. 1992; Spur G. & Holl S.-E. 1997; Suzuki K. et al. 1993; Warnecke G. & Zapp M. 1995).

Les cinématiques du processus de meulage sont superposés par un mouvement actif oscillant longitudinalement au cours du meulage assisté par ultrasons, pour réaliser différentes variantes cinématiques avec des positions respectives des partenaires actifs, outil et pièce, des vibrations ultrasonores peuvent être induites dans la zone de contact à la fois par l'outil et la pièce, cela permet de générer divers contours et structures dans la pièce et d'usiner toutes les surfaces

En comparaison avec le meulage conventionnel, les mécanismes de formation de surface et d'usure sont fondamentalement différents en raison de la superposition avec des vibrations ultrasonores (Spur G. & Holl S.-E. 1997).

L'excitation de l'oscillation est réalisée par un générateur de tension externe et un transducteur sonore selon le principe piézoélectrique. Une amplitude de sortie de seulement quelques micromètres est atteinte, qui peut être augmentée au moyen d'autres sonotrodes jusqu'à 80 µm, en fonction de l'application concernée.

### 2.5.2. Usinabilité des matériaux céramiques

Nombreuses investigations de rodage assisté par ultrasons affirment que le taux d'enlèvement de matière $Q_w$ augmente avec la diminution de la résistance à la traction de la céramique, la figure 2.6 illustre la profondeur de coupe en fonction de temps d'usinage pour différents matériaux céramique, Le taux d'enlèvement de la matière dans le meulage assisté par ultrason est fortement lié à la matière, en plus de la valeur de $K_{1c}$, cependant, la résistance à la rupture, la dureté, les comportements de coupe jouent également un rôle important. En somme, le taux d'enlèvement de matière résultant peut être considéré comme relativement élevé.

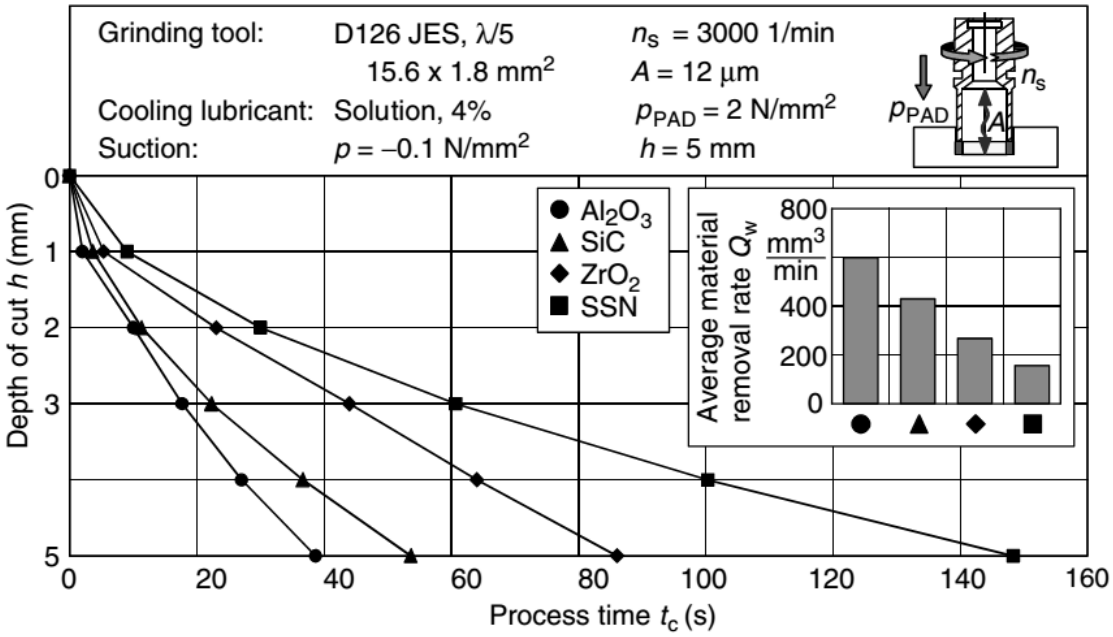



***Figure 2.6 :*** *Profondeur de coupe en fonction de temps d'usinage pour différents matériaux céramique (Spur G. et al. 1998)*

Par rapport au meulage conventionnel, le meulage assisté par ultrasons induit des contraintes mécaniques plus élevées et des contraintes thermiques plus faibles, en raison des mouvements cinématiques actives altérées, la vibration ultrasonique produit des angles d'engagement plus grands ainsi que des longueurs de coupe plus courtes et des profondeurs d'engagement plus élevées, ce qui entraîne de grandes contraintes mécaniques affectant le bord de l'outil et le matériau.

### 2.6. Procédés de meulage assisté par ultrason

Au cours de meulage, la fréquence ultrasonique peut être introduite dans la zone de contact par l'outil ainsi que par la pièce à usiner. Une excitation de l'oscillation de la pièce à usiner aura lieu lorsque les dimensions et le poids de l'outil ne permettent pas une introduction de hautes fréquences des oscillations à faibles amplitudes. En fonction de la position des partenaires actives l'un par rapport à l'autre et de la direction des oscillations, il existe différentes modifications de procédé qui permettent la réalisation d'opérations d'usinage qui sont représentées sur la figure 2.7.

Il a été prouvé que l'amélioration des processus grâce à la superposition ultrasons peut être réalisé, en particulier lorsque le meulage est caractérisé par un contact constant entre la pièce et l'outil (Spur G. & Holl S.-E. 1997).

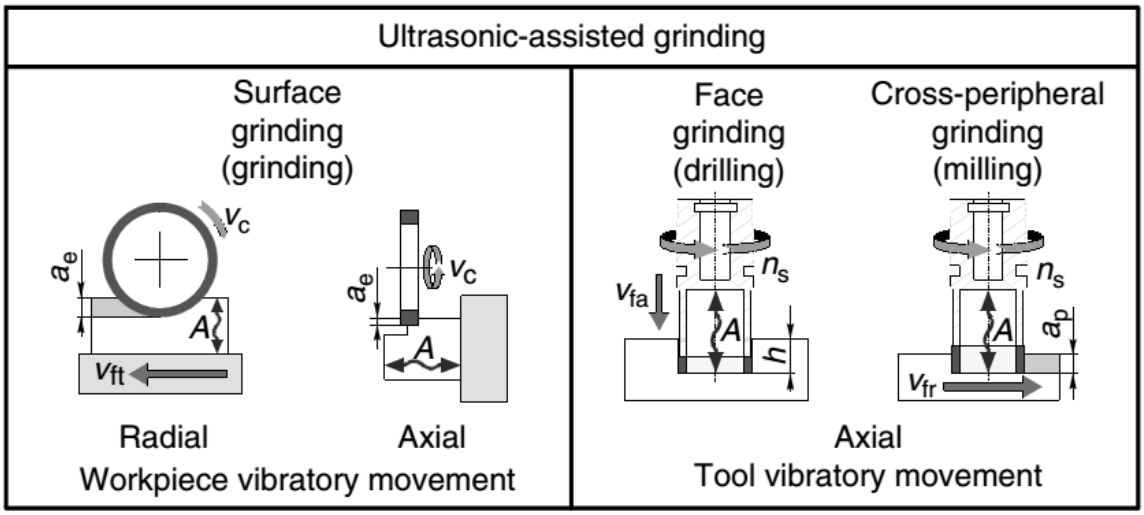



***Figure 2.7 :*** *Les variantes de procédé de meulage assisté par ultrason (Uhlmann E. & Holl S.-E. 1998).*

En ce qui concerne les matériaux céramiques, l'usinage de formes complexes telles que des perçages, des rainures, des surfaces sphériques, des surfaces sculptées, ou des structures en filigrane est particulièrement intéressant. Dans ce contexte, le meulage assisté par ultrasons offre une alternative efficace aux technologies déjà utilisées, la plupart du temps non rentables, ou comparativement coûteux. De plus, les ultrasons permettent une structuration ciblée de la surface de la pièce, ce qui peut par exemple être utilisé pour éviter des traces d'usinage directionnelles.

### 2.6.1. Meulage assisté par ultrasons avec excitation de l'outil :

Le meulage assisté par ultrasons avec excitation de l'outil est divisé en différents processus. Dans le cas du meulage transversale-périphérique assistée par ultrasons, le mouvement d'avance se fait perpendiculairement à l'axe de la broche et par conséquent la génération de l'oscillation. Avec ce procédé, des rainures, des ouvertures, et des rayons peuvent être usinés dans des matériaux fragiles et durs. Le mouvement d'avance dans le cas du meulage en bout assisté par ultrasons est parallèle à l'axe de l'outil. Cependant, des alésages peuvent être usinés avec ce processus.

#### 2.6.1.1. Meulage en bout :

Le perçage avec le meulage en bout peut être réalisé avec une trajectoire contrôlée de l'outil de coupe ou bien avec une force contrôlée de la vitesse d'avance. La machine utilisée joue un rôle déterminant dans le choix des paramètres de contrôle, bien que les machines ultrasoniques

fonctionnent préférablement avec une force contrôlée, le meulage en bout est réalisé habituellement avec une trajectoire contrôlée de l'outil de coupe.

### a) Vitesse de coupe avec trajectoire contrôlée de l'outil :

La figure 2.8 illustre que le meulage sans assistance ultrasonique donne un comportement de processus médiocre en raison de l'augmentation des forces axiales qui surviennent dans ce cas. Après un temps d'usinage de $t_c$ = 22sec, la force atteint déjà une valeur de $F_z$ = 240 N, qui ne peut plus être tolérée, de sorte que le processus doit être arrêté. Le contact permanent entre l'outil et la pièce est vraisemblablement responsable de l'émoussement rapide de l'outil, conduisant à une capacité de coupe fortement réduite. Il en résulte une énorme augmentation de la force, si les vitesses de coupe sont constantes. Par conséquent, une production économique de ces contours avec des méthodes conventionnelles (meulage sans ultrasons) est impossible.

L'utilisation de l'assistance ultrasonique, en revanche, ne conduit qu'à une légère augmentation de force donc un processus stable pendant toute la durée d'usinage ainsi qu'un faible émoussement de l'outil de coupe, en outre les effets de friction dans la zone de contacte sont considérablement réduits avec le lubrifiant de refroidissement.

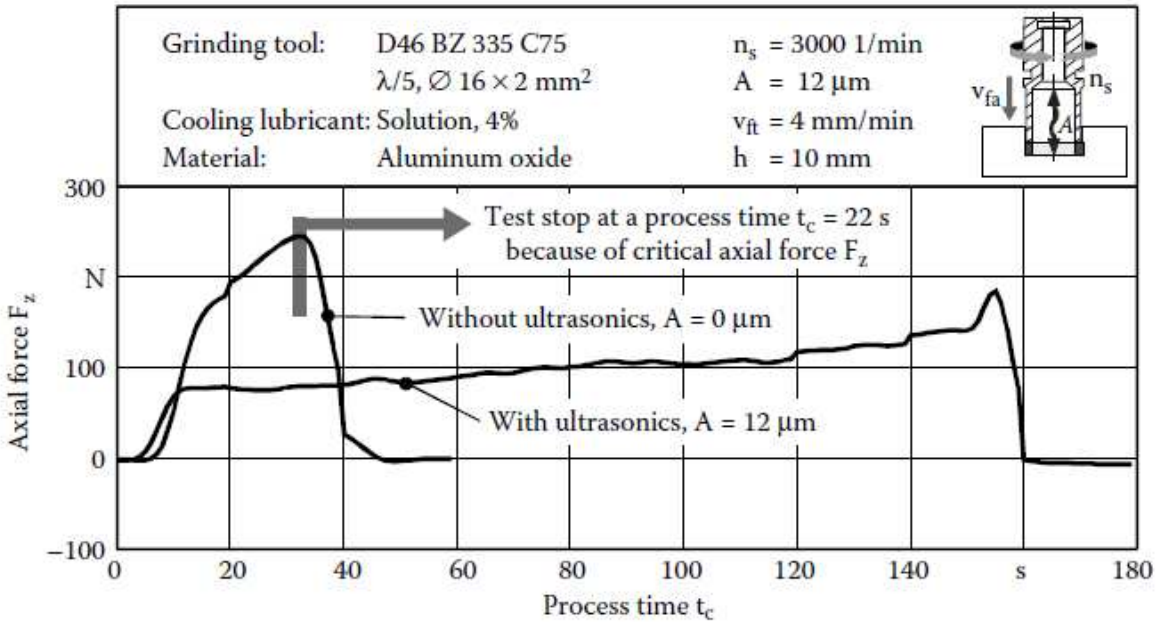



**Figure 2.8 :** Comparaison entre les forces axiale pendant le perçage avec trajectoire de l'outil contrôlé avec et sans effet ultrasonique (Ioan D. Marinescu 2007).

La taille relativement petite du grain (D46) permet l'obtention de bonnes qualités de surface et des formes précises. Les taux d'usure axiale sont environ 5-10 µm par 10 mm de profondeur de coupe, compte tenu de la précision de la machine de positionnement pour être utilisés.

**b) Vitesse de coupe avec force contrôlée :**

Lorsque la vitesse de coupe avec force contrôlée est utilisée, l'outil pénètre dans la pièce avec une pression d'appui constante $p_{PAD}$. Sans l'assistance ultrasonique, la vitesse de coupe axiale diminue rapidement vers zéro, ce qui peut être expliqué de la même manière que la section précédente par l'émoussement de l'outil. Le processus se met à l'arrêt après quelque millimètre. Ce serait trop couteux donc ce n'est pas rentable pour l'industrie. En revanche, l'assistance ultrasonique produit des courses d'usinage pratiquement stationnaire qui sont aussi stable dans des profondeurs de coupe importantes. La vitesse de coupe ainsi que le taux de matériaux enlevé augmentent avec l'augmentation de la vitesse rotationnelle, la pression d'appui, et l'amplitude jusqu'à ce que la limitation technique de la machine soit atteinte.

#### 2.6.1.2. meulage transversale-périphérique :

Au cours du meulage transversale-périphérique, l'engagement de l'arête de coupe n'est pas interrompu parce que le côté extérieur de l'outil est en contact avec la pièce. Plutôt, un engagement de grain sinusoïdal peut être observé à la suite de l'oscillation axiale. L'engagement à la face frontale de l'outil s'effectue selon les conditions de mouvement décrites pour le meulage longitudinal périphérique avec une excitation radiale, conduisant à des engagements individuels locaux.

La figure 2.9 montre la topographie et la rugosité des surfaces de différentes céramiques après le meulage transversale-périphérique assisté par ultrason. La rugosité de surface obtenue correspond à des valeurs de meulage conventionnel.

Dans certaines conditions cinématiques, le résultat d'un mouvement ultrasonique vertical à la surface de la pièce est une interruption complète de contact entre la pièce et l'outil. Sur tous les matériaux, des structures typiques de surface (*pocket-type)* peuvent être observés comme un effet de mouvement ultrasonique axial. La topographie dépend de la ténacité de la matière usinée (Engel H. & Daus N.-A. 1999).

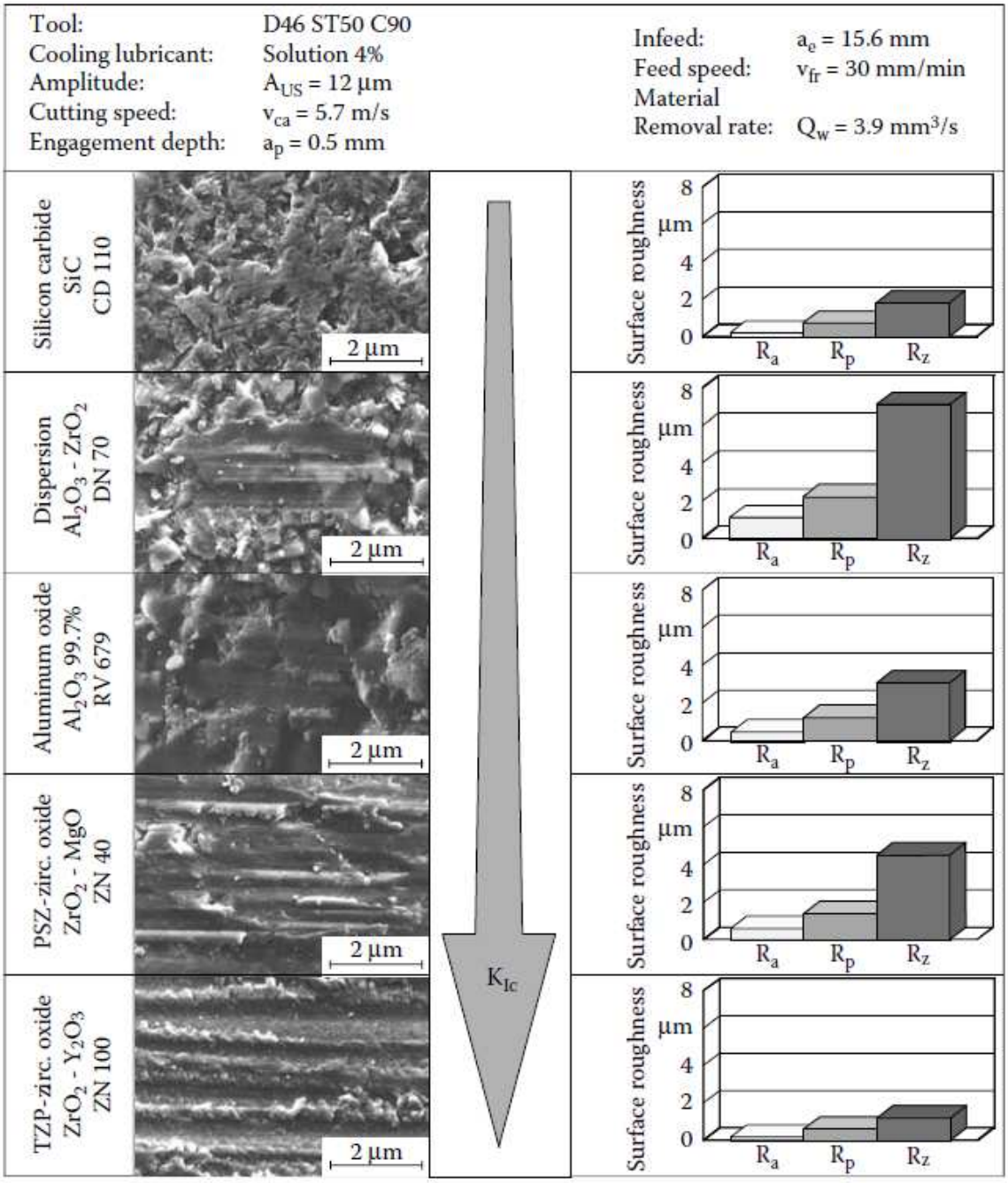



**Figure 2.9 :** Topographie et la rugosité des surfaces de différentes céramiques après le meulage transversale-périphérique assisté par ultrason (Engel H. & Daus N.-A. 1999).

La figure 2.10 montre le taux d'enlèvement de la matière durant le meulage transversale-périphérique assisté par ultrason de différents matériaux céramiques. La vitesse d'avance a été contrôlée dans les tests par la détermination d'une force maximale de processus dans la direction de coupe. Les forces de processus plus petites conduisent à des vitesses d'avance plus élevées donc, à la croissance des taux d'enlèvement de la matière. Contrairement au meulage

transversale-périphérique assisté par ultrason avec une vitesse d'avance constante, ce type de contrôle de processus empêche les fortes contraintes inadmissibles sur l'outil.

En raison de la superposition du processus de meulage par ultrasons, des taux d'enlèvement de matière plus élevés peuvent être réalisés pour tous les matériaux étudiés et utilisés. On peut voir que la taille des grains de diamant n'est pas déterminante pour le taux d'enlèvement de matière atteignables au cours de meulage transversale-périphérique assisté par ultrason. Il existe une corrélation entre cette déclaration et les investigations de (Pei Z. J. & Ferreira P. M. 1999) qui ont observés ce comportement lors de l'usinage de l'oxyde de zirconium. Il devient clair que les propriétés mécaniques du matériau usiné ont une influence significative sur le résultat de l'usinage.

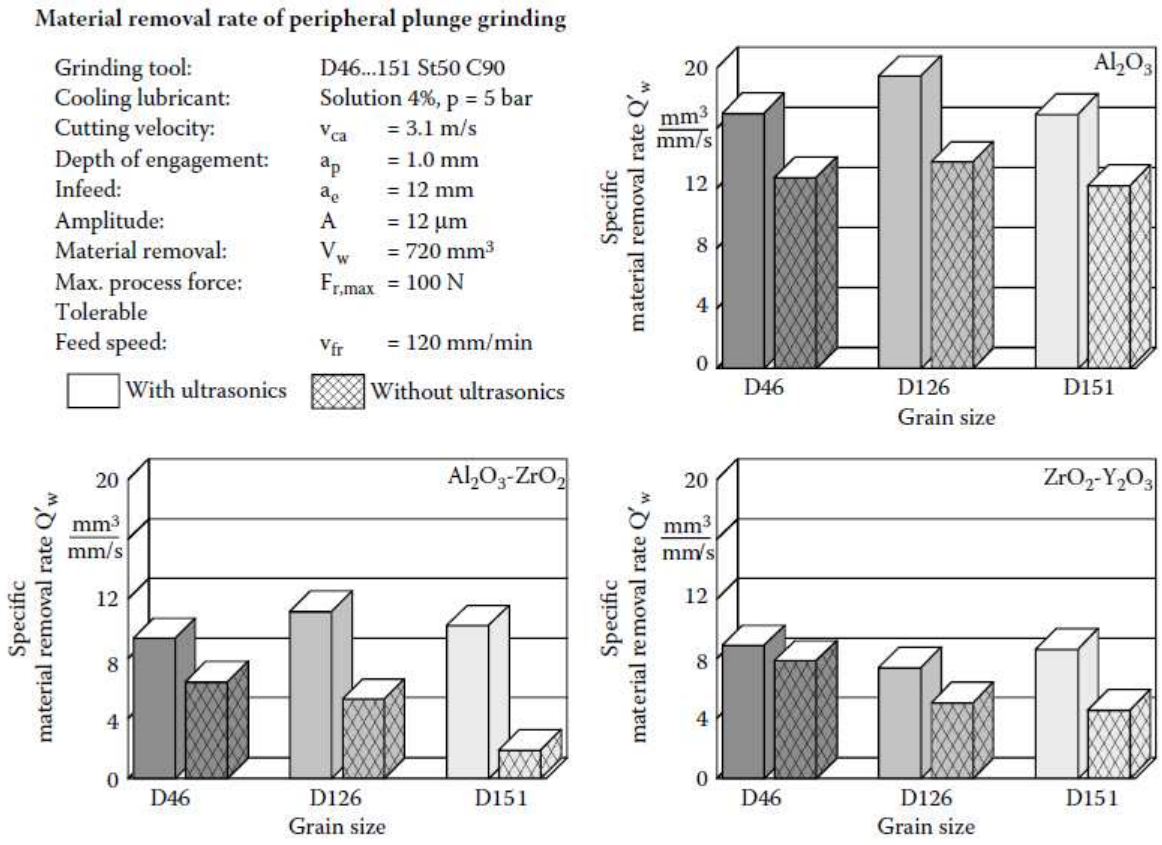



***Figure 2.10 :*** *Taux d'enlèvement de la matière durant le meulage transversale-périphérique assisté par ultrason de différents matériaux céramiques(Ioan D. Marinescu et al. 2007).*

Les qualités de surface obtenues sont fortement dépendantes des caractéristiques des matériaux usinés et du processus d'usinage. Ceci peut être prouvé en comparant les qualités de surface de la céramique, qui sont usinées avec le meulage assisté par ultrasonique et le meulage

conventionnel (voir figure 2.11). En excluant le matériau de carbure de silicium, l'écart moyen arithmétique des échantillons meulé à l'aide d'ultrasons est légèrement supérieur à la valeur établie par meulage conventionnel.

Pour les matériaux de carbure de silicium et d'oxyde de zirconium les meilleures valeurs de surface ont été mesurées au cours du meulage assisté par ultrasons. En résumé, les qualités de surface obtenues pour les matériaux céramiques usinées avec meulage assisté par ultrasons peuvent être établies au niveau des procédures classiques de finition. En dépit des sollicitations mécaniques plus élevées, la qualité des surfaces comparables à celles du meulage conventionnel peut être atteinte.

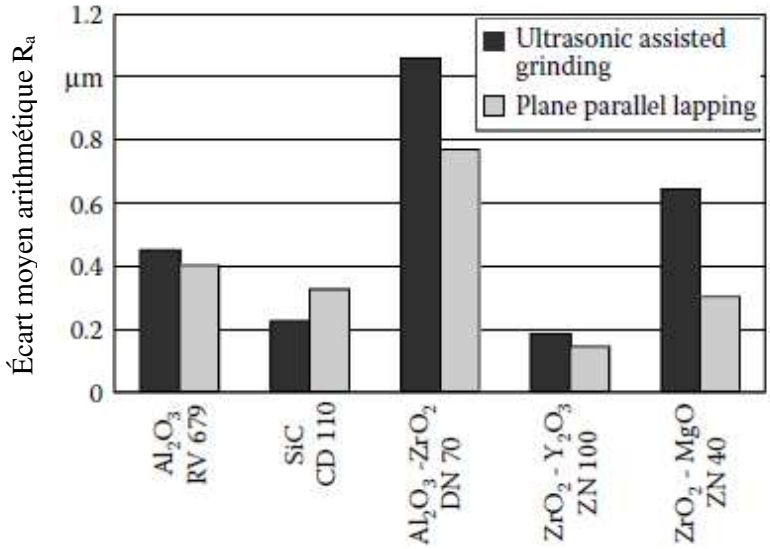



***Figure 2.11 :*** *L'écart moyen arithmétique en fonction du processus d'usinage et du matériau (Ioan D. Marinescu et al. 2007).*

### 2.6.2. Meulage assisté par ultrasons avec excitation de la pièce :

Selon la variante du procédé, une oscillation ultrasonique se superpose à la zone de contact soit verticalement, soit parallèlement à la surface de la pièce, en plus du mouvement de coupe conventionnel. Ce changement dans les rapports de vitesse, la vitesse de coupe qui en résulte conduit à des mécanismes d'usures, qui sont essentiellement différentes de celles de meulage conventionnel.

#### 2.6.2.1. Meulage périphérique avec assistance ultrasonique radiale :

L'enlèvement de la matière et les mécanismes d'usure de l'outil de meulage longitudinal périphérique avec excitation ultrasonore radiale de la pièce peuvent être décrits par la simulation de l'engagement d'un seul grain (Figure 2.12) et par des tests de scratch.

Si la vitesse d'avance est ignorée, le parcours d'un grain faisant un scratch, sans ultrasons, est décrit par un segment de cercle. Le grain pénètre dans le matériau jusqu'à la profondeur de coupe $a_{eG\text{-}CON}$, avec une vitesse constante de l'outil $v_s$, et un angle d'engagement définie, $a_{e\text{-}CON}$. La profondeur maximale de rayure est atteinte au point de la courbe la plus basse. Après avoir quitté la surface, le grain a marqué une trace d'une longueur *l*.
La vibration longitudinale supplémentaire de la pièce provoque des écarts importants dans une direction radiale à partir du trajet décrit auparavant. Selon les nombres de vibrations de la pièce qui sont réalisées par phase de contact, un certain nombre de rayures individuelles enfilé localement avec différentes profondeurs de scratch et de longueurs émergent à la place d'une rayure circulaire, La profondeur maximale de rayures augmente par la valeur de l'amplitude à des engagements de grain nominalement égal. Tant que $a_{eG\text{-}CON}$ est inférieure à l'amplitude, les interruptions de contact complet se produisent dans chaque cas entre les rayures locales du grain. En raison de la vitesse supplémentaire de la composante dans la direction radiale, le grain touche la surface à un large angle d'engagement avec une vitesse active supérieure. Chaque rayure locale du grain est caractérisée par un temps de contact, une longueur et une profondeur.

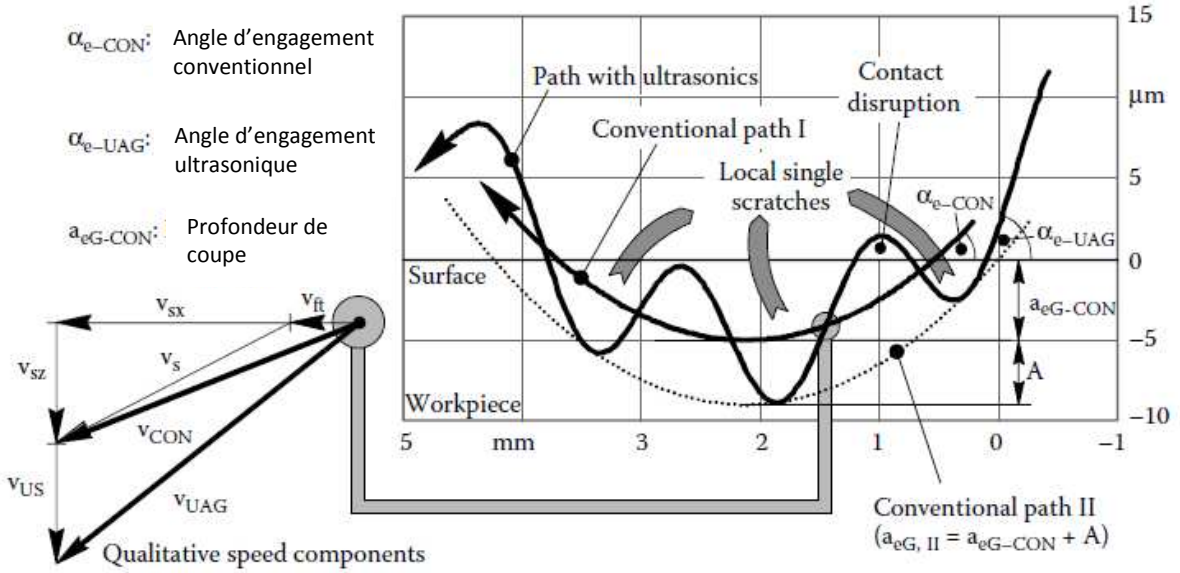



***Figure 2.12 :*** *Paramètres et simulation de l'engagement d'un grain abrasif pendant le meulage assisté par ultrasons (Uhlmann E. & Spur G. 1998)*

La figure 2.13 montre les surfaces des matériaux, nitrure de silicium (SSN), et de l'oxyde de zirconium ($ZrO_2$) rayés avec et sans l'aide d'ultrasons à des profondeurs maximales égales de scratch.

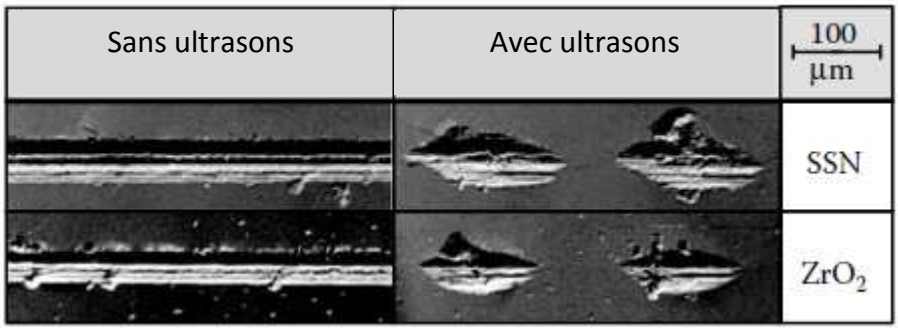



***Figure 2.13 :*** *Rayures sur différentes céramiques avec et sans ultrasons (Uhlmann E. & Spur G. 1998).*

La vitesse de l'outil de coupe a été fixé à $v_s$ = 5 m/s. Le scratch sans l'assistance ultrasonique conduit à des traces continues, qui présentent essentiellement des zones de déformation plastique sur le fond de la rayure, montrant en partie des traces d'autres arêtes de coupe individuelles, le processus d'enlèvement de matière se produit alors quand le grain abrasif se déplace de droite à gauche, ce qui, en raison de condition de contraintes critiques, provoque des fissures radiales sur les bords des rayures qui se propagent perpendiculairement à la direction de déplacement. En outre, il existe un certain nombre de fissures latérales qui dépendent de la valeur $K_{IC}$, ce qui conduit à la formation de copeaux conchoïdales.

En observant les traces générées à l'aide d'ultrasons, il devient clair que la trace entière est divisée en rayures locales du grain abrasif. Les interruptions de contact répétées sont dues à l'oscillation périodique de la pièce ainsi qu'au mouvement circulaire superposé des diamants à grain abrasif. L'effet de la lever complète et l'entrée à nouveau dans la surface de la pièce a été remarqué pour tous les matériaux testés. Les rayures sont principalement caractérisées par des déformations plastiques. Les fissures latérales sont formées sur les bords droits et gauches des rayures par rapport à la profondeur de l'indentation, ce qui entraîne la formation de copeaux conchoïdale.

L'effet de meulage assisté par ultrasons provoque une charge mécanique élevée sur le matériau et le grain abrasif, En outre, le temps de contact, et par conséquent, les effets de friction sont nettement réduits, ce qui diminue les charges thermiques.

L'entraxe théorique des deux rayures locales peut être déterminé approximativement à partir du rapport de vitesse de l'outil $v_s$, et la fréquence d'oscillation, *f*.

La figure 2.14 montre les forces normales et tangentielles résultant lors du meulage (creep feed grinding) de carbure de silicium, l'oxyde de zirconium et l'oxyde d'aluminium avec ou sans ultrasons. L'assistance ultrasonique conduit à une réduction significative des forces du processus, contrairement au meulage conventionnel. Sans assistance ultrasonique, l'arête tranchante du grain abrasif devient plate au cours du processus d'usinage, par conséquent, l'effort sur le grain augmente. Au-dessus d'une certaine charge marginale, les grands segments de grains se brisent ou se cassent.

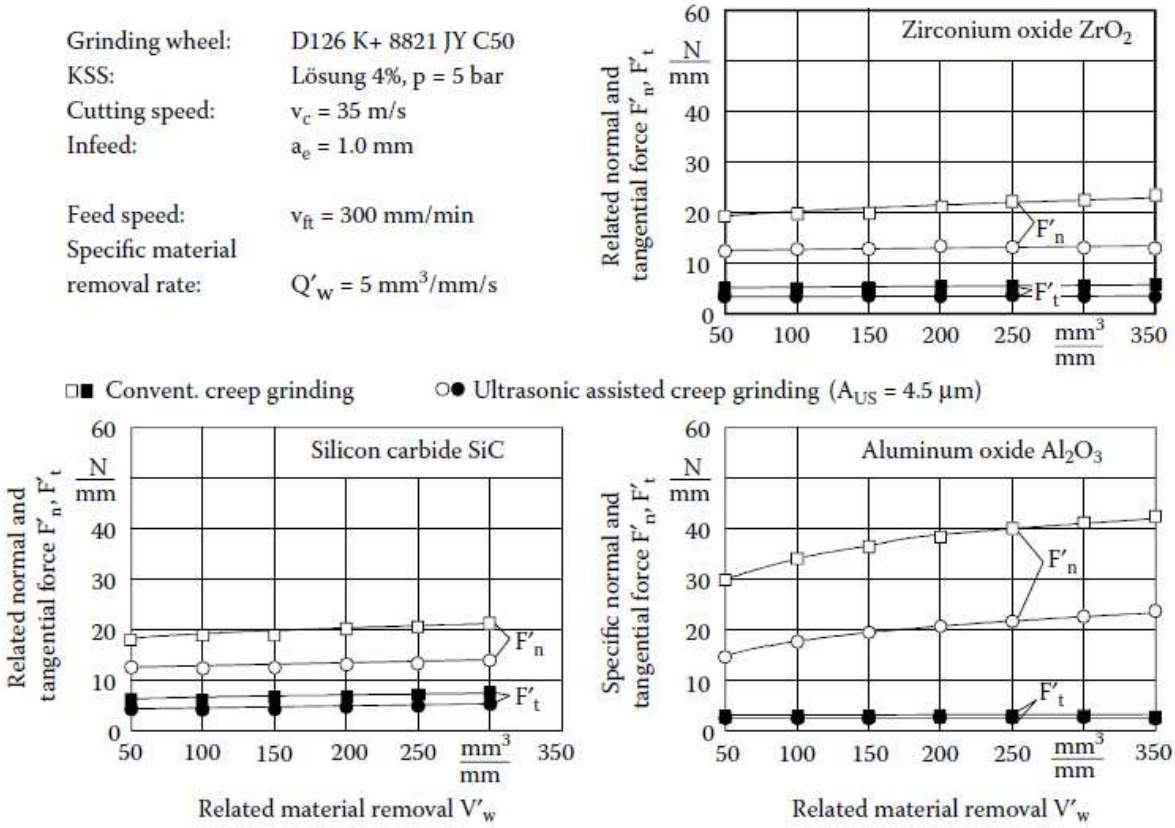



***Figure 2.14 :*** *Processus des forces conventionnel et assistées par ultrasons de différents matériaux céramiques (Ioan D. Marinescu et al. 2007).*

La figure 2.15 montre les valeurs de température intégrées dans la *subsurface* de différentes céramiques lors du meulage avec ou sans ultrasons. La mesure des valeurs de température a été réalisée avec des éléments thermiques, qui ont été placés dans la subsurface des pièces. Il

devient évident que l'assistance ultrasonique conduit à une diminution significative de la température.

L'interruption de contact entre l'outil et la pièce en raison de l'oscillation ultrasonique entraîne une réduction de temps d'engagement comme décrit ci-dessus. En outre, la pénétration du liquide de refroidissement dans la zone de contact est améliorée par la levée temporaire de l'un des partenaires actifs et par l'enlèvement de copeaux. La réduction des effets de friction diminuer l'aplatissement du grain abrasif qui peut être considéré comme une raison de la diminution de la température du processus.

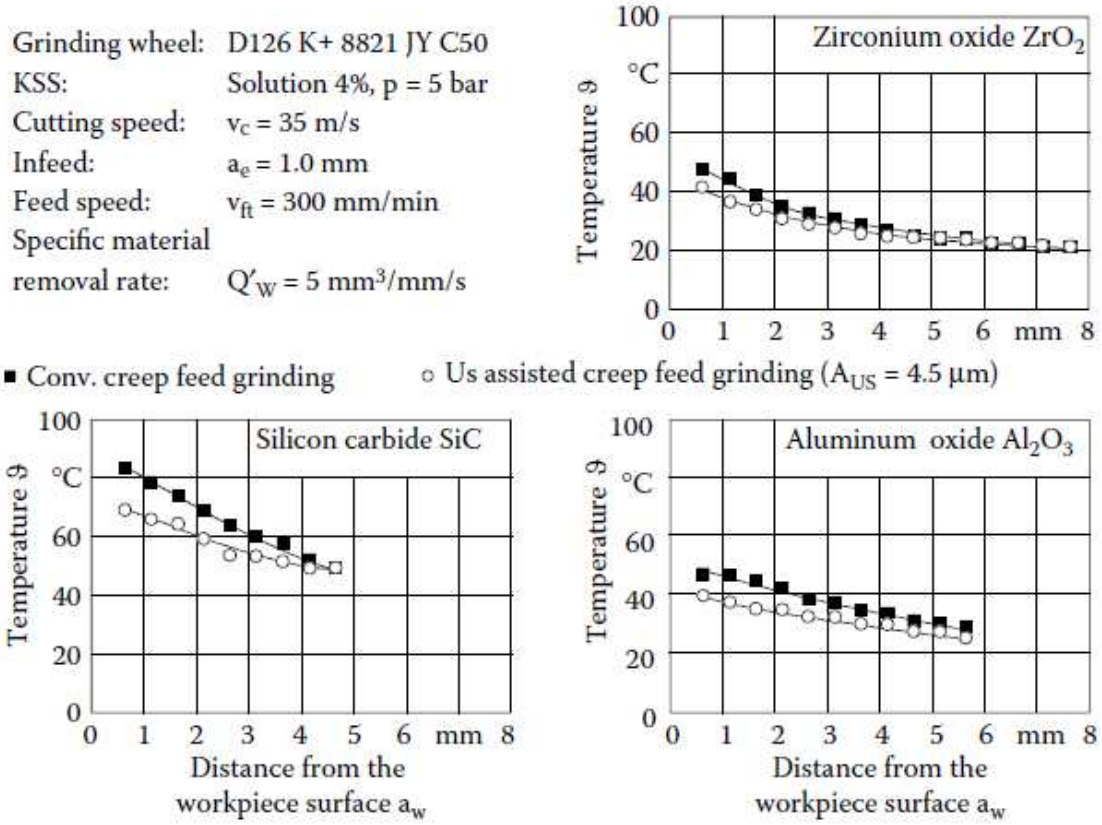



***Figure 2.15 :*** *Températures de la subsurface de la pièce au cours de meulage conventionnel et assisté par ultrason de différents matériaux céramiques (Ioan D. Marinescu et al. 2007).*

La figure 2.16 montre l'usure radiale de l'outil et la qualité de surface d'une céramique de nitrure de silicium. Tout comme dans le meulage conventionnel, l'usure radiale de l'outil de coupe augmente dans le meulage par ultrasons avec l'augmentation du taux d'enlèvement de matière. Dans le cas de meulage assisté par ultrasons, l'usure radiale de l'outil est plus élevée que dans

le meulage conventionnel. Avec un taux d'enlèvement de matière $Q'_w = 20\ mm^3/mm/s$, l'usinage a été impossible avec la méthode classique en raison des forces de processus inadmissibles.

La rugosité de surface augmente également avec l'augmentation du taux d'enlèvement de la matière dans les deux procédures. En meulage assisté par ultrasons, la rugosité de surface est plus élevée que dans le meulage conventionnel.

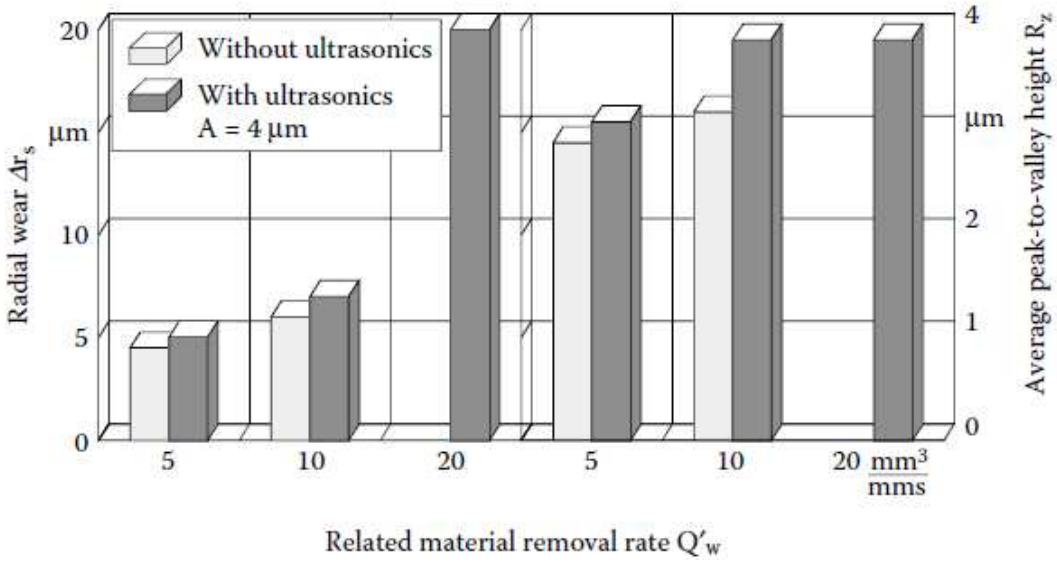



***Figure 2.16 :*** *Usure radiale de l'outil et qualité de surface de nitrure de silicium pendant le meulage conventionnel et assisté par ultrasons (Ioan D. Marinescu et al. 2007).*

#### 2.6.2.2. Meulage périphérique avec l'assistance ultrasonique axiale :

Le meulage longitudinal périphérique avec l'assistance ultrasonique axiale est caractérisé par un changement périodique de la direction d'usinage avec un engagement continu de l'arête de coupe. Les surfaces de pièces nouvellement créés ont des marques d'usinage sinusoïdales.

La figure 2.17 montre le principe du changement de direction de coupe qui en résulte en raison de la superposition du procédé de meulage conventionnel à l'oscillation ultrasonique. A travers cette superposition, il va y avoir un changement constant et découlant supplémentaire de la vitesse, qui est transversale par rapport à la vitesse de coupe définie sur la machine. Etant donné que les vibrations ultrasoniques suivent mathématiquement une fonction sinusoïdale, la vitesse liée à l'ultrason varie entre zéro et une valeur maximale, déterminée par la fréquence et l'amplitude définies sur la machine. Par conséquent, la vitesse d'usinage qui en résulte ne se produit pas seulement dans la direction d'avance, mais, aussi, dans la direction transversale.

Egalement, les changements de vitesses au sein d'une demi-période d'oscillation ultrasonique, qui soit à moins de 1 / 44000ème d'une seconde à partir de zéro à la valeur maximale.

La vitesse de coupe résultante conduit à un changement constant de la direction des contraintes de l'arête de coupe. Contrairement à un meulage conventionnel, ou la zone engagée des arêtes de grain abrasif changent.

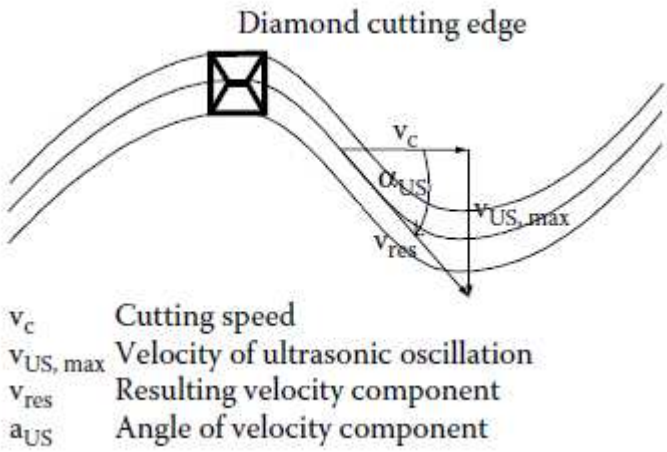



***Figure 2.17 :*** *Principe de la superposition de la vitesse au cours du meulage avec l'assistance ultrasonique axiale (Warnecke G. & Zapp M. 1995).*

Dans le meulage conventionnel, les traces d'usinage vont dans la direction de coupe. Dans le meulage assisté par ultrasons à excitation radiale, les traces d'usinage sont également parallèles à la direction de coupe, constitué d'impact individuel. La vibration dans la direction axiale provoque des marques d'usinage, perpendiculairement à la direction de coupe. La figure 2.18 montre la surface d'une pièce en nitrure de silicium après le meulage avec l'assistance ultrasonique axiale.

À une vitesse de coupe $v_c$ = 1 m / s, une fréquence ultrasonique $f$ = 21 kHz et une amplitude A = 4,5 um, le rapport de l'amplitude des oscillations et la longueur d'onde est si élevée que les courses des oscillations générées peuvent être clairement reconnues. La pénétration a été définie à un $a_e$ = 2 µm lors de ces essais.

La création de structures de surface à l'aide d'ultrasons axiale est possible, si l'outil, le matériau et les paramètres du processus sont adaptés aux conditions requises. La forme des traces formées peut être spécifiquement fixée par le choix des paramètres de vitesse de coupe, de fréquence ultrasonique, et d'amplitude.

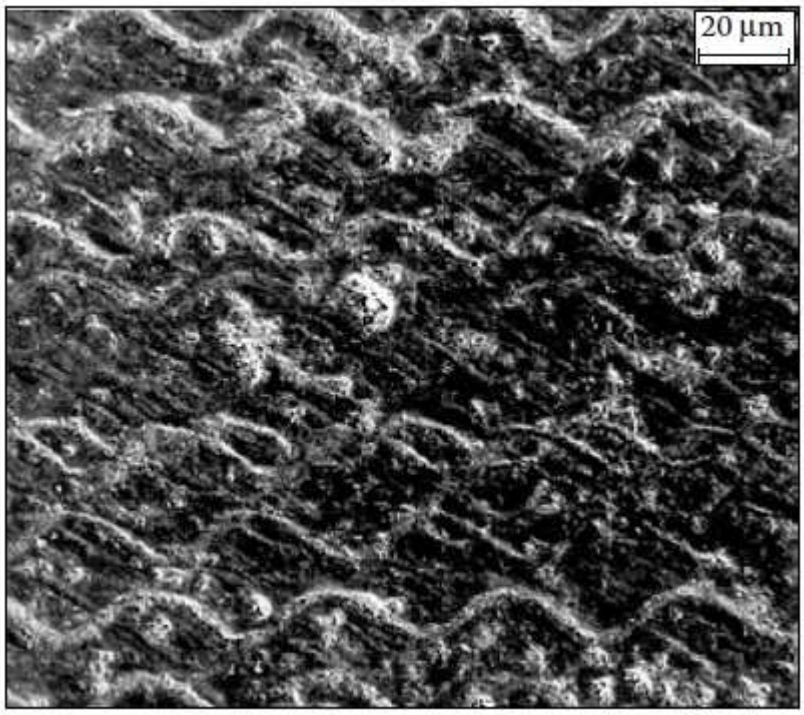



***Figure 2.18 :*** *Surface structurée du nitrure de silicium (Warnecke G. & Zapp M. 1995).*

Au cours de l'usinage par la superposition des oscillations axiales, les forces de processus sont réduites par rapport à un meulage classique. En raison de la direction d'usinage en constante changement, l'usure de l'outil est nettement plus petite. Ainsi, les zones de bords tranchants d'un grain de coupe engageaient de manière cohérente dans le matériau, ce qui conduit à la réduction des forces de processus. En conséquence de la proportion de frottement réduite par les arêtes de coupe, les contraintes thermiques sont réduites dans leurs ensembles. La température de la zone de contact peut être réduite, bien que de l'énergie supplémentaire est importé dans le processus par la superposition haute fréquence des oscillations (Warnecke G. & Zapp M. 1995).

## 2.7. Conclusion :

Le meulage assisté par ultrasons est un nouveau processus de finition pour un usinage économique des matériaux fragiles et durs. La superposition de la cinématique du processus de meulage au moyen d'oscillations ultrasonores conduit à l'enlèvement et à l'usure des mécanismes différents de celle de meulage conventionnel. Il y a des micro fissures en raison de la forte contrainte des grains abrasifs, ce qui provoque la formation constante de nouvelles arêtes vives. Les processus sont caractérisés par de faibles forces avec un processus quasi stationnaire pendant l'usinage permettant une augmentation des taux d'enlèvement de matière.

Dans le meulage périphérique avec l'assistance ultrasonique radiale, une réduction des forces allant jusqu'à 90% peut être observée à la différence de meulage conventionnel avec le même taux d'enlèvement de la matière. En même temps, l'usure de l'outil ainsi que la qualité de surface de la pièce usinée augmente légèrement. Dans le meulage longitudinal périphérique avec assistance ultrasonique axiale, des surfaces structurées seront formées et les traces d'usinage directionnel peuvent être évitées avec l'aide de la cinématique.

Dans le meulage transversal périphérique avec excitation ultrasonore axiale, des contours complexes avec un taux d'enlèvement de matériau élevés peuvent être atteint malgré, les vitesses de coupe faibles. En même temps, de bonnes qualités de surface et une précision de forme supérieure peuvent être réalisés.

À l'avenir, le fonctionnement des processus peut être amélioré grâce à la définition des paramètres optimaux harmonisés pour l'oscillation ultrasonore et pour le processus de meulage. De plus, les outils doivent être conçus pour les besoins de meulage par ultrasons en termes de liaisons, de taille des grains abrasifs.

Ces résultats montrent que le meulage assisté par ultrasons assure l'usinage de la céramique en termes d'efficacité économique élevée et de qualité des composants. Grâce à la diversité des variantes du procédé cinématique, il est possible d'usiner différentes formes géométriques et d'éléments sur des matériaux fragiles et durs.

## 2.8. Référence bibliographiques :

Bifano T. G., Dow T. A. & Scattergood R. O. 1991. Ductile-Regime Grinding: A New Technology for Machining Brittle Materials. Journal of Engineering for Industry-Transactions of the ASME 113.184-89.

Colwell L. 1956. The Effects of High-Frequency Vibrations in Grinding. Transactions of ASME.S124–31.

Dongxi Lv, HongxiangWang, Yongjian Tang, Yanhua Huang & Zhiping Li. 2013. Influences of vibration on surface formation in rotary ultrasonic machining of glass BK7. Precision Engineering 37.839–48

Engel H. & Daus N.-A. 1999. Veränderung des Wirkmechanismus beim Schleifen durch Ultraschallunterstützung und daraus resultierende Prozeßverbesserungen. Vortrag zum Seminar “Hybride Prozesse der Zerspan- und Abtragtechnik.” TU Dresden.

Haas R. 1991. Technologie zur Leistungssteigerung beim Ultraschallschwingläppen. . Dissertation RWTH Aachen, Germany, .

Ioan D. Marinescu. 2007. HANDBOOK OF ADVANCED CERAMICS MACHINING: Taylor & Francis Group, LLC

Ioan D. Marinescu, Mike Hitchiner, Eckart Uhlmann, W. Brian Rowe & Ichiro Inasaki. 2007. Handbook of Machining with Grinding Wheels: Taylor & Francis Group.

KUO Kei-lin & TSAO Chung-chen. 2012. Rotary ultrasonic-assisted milling of brittle materials Trans. Nonferrous Met. Soc. China 22.s793−s800

Muhammad Arif, Mustafizur Rahman & Wong Yoke San. 2012. A state-of-the-art review of ductile cutting of silicon wafers for semiconductor and microelectronics industries. nt J Adv Manuf Technol 63.481–504.

Nerubai M. 1977. Leistungssteigerung beim Schleifen mit Diamant unter Ultraschall. Stanki i Instrument, 2, Moskau, UdSS, .

Pei Z. J. & Ferreira P. M. 1999. An Experimental Investigation of Rotary Ultrasonic Face Milling. Int. J. Mach. Tools Manuf. 39.1327–44.

Prabhakar D., Fereira P.M. & Haselkorn M. 1992. An experimental investigation or material removal rates in rotary ultrasonic machining. Transactions of the North American Manufacturing Research Institution of SME, the 20th NAMRC Conference, Washington State University, Pullman, WA, USA, .S211–18.

Spur G. & Holl S.-E. 1997. Material removal mechanisms during ultrasonic assisted grinding. Production Engineering IV/2.9-14.

Spur G. & Krieg G. H. 1995. The influence of machine tool materials on the wear of profile tools in ultrasonic fine lapping of reinforced high-performance ceramics. Production Engineering II/2.

Spur G., E. Uhlmann & Holl S.-E. 1998. Ultrasonic assisted grinding of ceramics. Proceedings of the 9th CIMTEC World Ceramic Congress, Florenz, Italy 14.–19.06.1998.

Suzuki K., Tochinai H., Uematsu T. & Nakagawa T. 1993. New grinding method for ceramics using a biaxially vibrated nonrotational ultrasonic tool. CIRP Annals, 42.375-78.

Uematsu T., Suzuki K., Yanase T., Nakagawa T. & Bekrenev N. 1988. A new complex grinding method for ceramic materials combined with ultrasonic vibration and electrodischarge machining. The Winter Annual Meeting of the ASME, Chicago, IL, USA.

Uhlmann E. & Holl S.-E. 1998. Schwer zerspanbare Werkstoffe ultraschallunterstützt schleifen. Maschinenmarkt 104.34–37.

Uhlmann E. & Spur G. 1998. Surface Formation in Creep Feed Grinding of Advanced Ceramics with and without Ultrasonic Assistance. CIRP Annals - Manufacturing Technology 47.249-52.

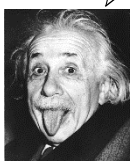
Warnecke G. & Zapp M. 1995. Ultrasonic superimposed grinding of advanced ceramics. First International Machining and Grinding Conference, Dearborn, Michigan, USA.1-11.

Wood E.W. & Alfred L. Loomis. 1927. XXXVIII. The physical and biological effects of high-frequency sound-waves of great intensity. Philosophical Magazine Series 7 4:22.417-36.

Yano A., Shinke N. & Tanaka Y. 1970. Untersuchungen über das Ultraschallschwingschleifen. Maschinenmarkt 76, 64.S1452–56.

# III La Subsurface endommagée dans les verres optiques

*“ Une personne qui n'a jamais commis d'erreurs n'a jamais tenté d'innover. “*



*Albert Einstein*

*(1879 - 1955)*

## 3. La Subsurface endommagée dans les verres optiques :

### 3.1. Introduction :

Le meulage et le doucissage des matériaux fragiles provoquent généralement une couche fissurée sous la surface supérieure des verres optiques ; à savoir la SSD, (*Subsurface damage)* qui prend généralement la forme de microfissures. Cette couche résultante de l'enlèvement de matière peut affaiblir la résistance mécanique du matériau micro fissuré, de servir de réservoir d'absorption de rayons lasers, de contaminer le polissage, d'augmenter le champ électrique à l'intérieur des fissures. Par conséquent, une grande influence sur la durabilité de fonctionnement et la durée de vie des composants dans, les systèmes de forte puissance laser, l'industrie des semi-conducteurs, les applications militaires et astronomiques (Bloembergen N. 1973; Campbell H. 2002; Hed P.P. et al. 1988; House R.A. et al. 1977; Kasai T. 2000; Neauport C. et al. 2009). Dans les procédés de fabrication des composants optiques, l'endommagement de la couche fissurée est introduit au cours des premières étapes de l'usinage (la plupart du temps dans les processus de meulage) et diminue dans les processus ultérieurs (Golini D. & Jacobs S.D. 1991). Le matériau est enlevé avec des abrasifs progressivement plus fins et chaque étape supprime suffisamment de matière sur la surface des substrats afin de se débarrasser de la couche endommagée laissée par les étapes précédentes et de réduire éventuellement la subsurface, autant que possible (Campbell H. 2002). Éliminer les endommagements de la subsurface et obtenir une surface parfaite, tel est le but ultime de la fabrication optique. Des efforts considérables ont été déployés pour atteindre ce but. Certaines technologies nouvellement proposées (Par exemple, meulage ductile des matériaux fragiles, finition magnétorhéologique, traitement par plasma d'atomes réactifs(RAP), etc.) montrent un grand potentiel pour raccourcir le temps d'usinage et engendrer peu d'endommagement à la surface des substrats optiques ainsi traités, grâce à leurs mécanismes uniques d'enlèvement de matière (Jacobs S.D. et al. 1999; Jacobs S.D. et al. 1998; Lambropoulos J. C. et al. 1997; Pollicove H. & Golini D. 2003; Verma Y. et al. 2006). Mais la plupart des ateliers d'optiques sont équipés par de machines conventionnelles qui ne suppriment pas la couche endommagée complètement. D'un autre côté, il a été prouvé que la couche endommagée SSD dépend fortement des conditions de fabrication (Miller P.E. et al. 2005; Zhang W. & Zhu J. 2009). De ce fait, l'évaluation de la couche endommagée SSD dans les composants optiques joue un rôle essentiel dans l'optimisation des procédés de fabrication pour améliorer l'efficacité d'usinage et de réduire le temps et le coût de reviens.

De nombreuses méthodes ont été appliquées pour évaluer les endommagements de subsurface, qui favorisent considérablement la fabrication optique (Brinksmeier E. 1989; Green R.E. 1990; Lucca D.A. et al. 1998; Shen J. et al. 2005). D'une manière générale, ces méthodes se divisent en deux catégories : l'évaluation destructive et non destructive. Les méthodes destructives peuvent mesurer la profondeur de la subsurface précisément et quantitativement et peuvent fournir des informations utiles sur les échantillons testés, mais ils peuvent prendre beaucoup de temps et, inévitablement, modifier ou même détruire les échantillons testés. Par conséquent, les échantillons ne peuvent plus être utilisés et le coût de production peut être soulevé. Un autre inconvénient des méthodes destructives est que ces méthodes sont généralement statiquement significative, et il est peu probable d'examiner toute la subsurface de l'échantillon. Ainsi l'endommagement de subsurface de la zone mesurée peut ne pas refléter pleinement les caractères de l'ensemble de l'échantillon. Par conséquent, certains moyens non destructifs ont été invoqués pour examiner les composants optiques rapidement sans endommager les échantillons. De nombreuses méthodes pratiques ont été introduites au cours des dernières décennies ; ces techniques fonctionnent bien pour certains matériaux spécifiques et procédés de fabrication. Néanmoins, les mesures non destructives ont des limites évidentes : elles sont généralement très dépendantes de l'opérateur ; elles fournissent parfois seulement des données qualitatives ; elles exigent que le spécimen doit être mesurable ; les appareils de mesures non destructives sont généralement coûteux et les mécanismes sont assez compliquées ; etc. (Hellier C.J. 2003)

### 3.2. Endommagement de la subsurface dans les matériaux fragiles :

Les matériaux fragiles comme le verre, les céramiques et les vitrocéramiques sont de plus en plus intéressants dans de nombreuses applications d'ingénierie. Cependant, en raison de leur dureté élevée H (résistance à la déformation plastique), leur fragilité qui peut être défini simplement comme H / Kc, où Kc est la ténacité,( résistance à la rupture) (Lawn B.R. & Marshall D.B. 1979)), ces matériaux sont difficiles à usiner. En général, le meulage et / ou le rodage sont employés pour usiner précisément ces matériaux dans la fabrication optique. Ce procédé de fabrication génère habituellement des dommages sous / dans la surface des matériaux fragiles à la suite d'un mécanisme d'enlèvement de matière. (Buijs M. & Hounten K. K. 1993; Evans C.J. et al. 2003). Afin de comprendre les caractéristiques fondamentales de la fracture du verre optique pendant le meulage, les processus d'indentation et de scratch qui impliquent l'interaction entre les gains abrasifs et le spécimen ont été réalisés par de nombreux chercheurs, Les contributions dans ce domaine ont été passées en revue par

(Malkin S. & Hwang T.W. 1996). Il a été constaté que les processus d'indentation et scratch en mode fragile impliquent généralement deux systèmes de fissures principaux : (i) fissures latérales responsable de l'enlèvement de matière et de la formation de surface. (ii) fissure médianes responsable de la formation de la couche endommagée en conséquence la dégradation de la résistance mécanique. Ceci est représenté dans la figure 3.1

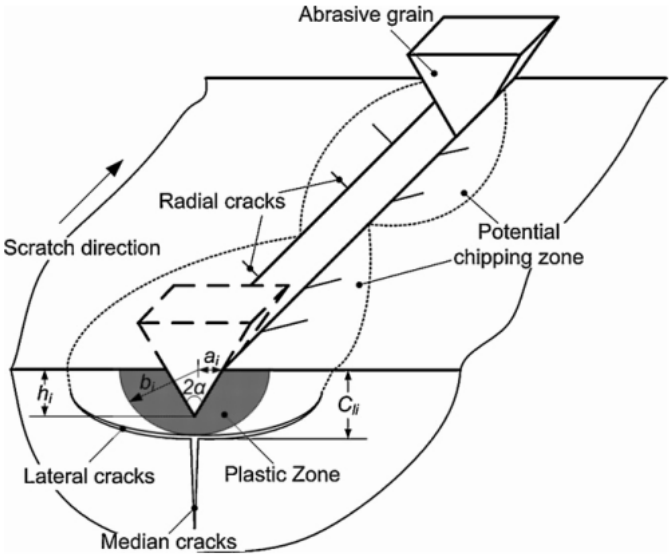



***Figure 3.1 :*** *Mécanisme d'enlèvement de la matière dans le mode fragile (Malkin S. & Hwang T.W. 1996)*

La surface meulée est transférée vers des ateliers de polissage où les composants optiques sont polis avec des abrasifs de polissage appropriés. L'endommagement de subsurface est enlevé et l'erreur de forme de surface est corrigée. Une quantité de matière suffisante doit être enlevée dans le processus de polissage afin d'éliminer la SSD laissée par le meulage / rodage (Belkhir et al. 2009). Toutefois, le polissage est un procédé chimico-mécanique complexe au cours duquel une couche hydratée est généré et se dépose sur la surface supérieure (Izumitani T. & Harada S. 1971). C'est cette mince couche qui contribue à l'élimination de la matière dans le procédé de polissage de verre, Malheureusement cette couche peut aussi cacher ou recouvrir l'endommagement originaire du procédé de meulage et rodage qui doit être poli complètement. En conséquence la couche endommagée doit être évaluée avant et après le processus de polissage, afin de vérifier si l'endommagement de la subsurface est contrôlé au-dessous du niveau souhaité. L'illustration conceptuelle de l'endommagement de la subsurface au cours de la fabrication d'un composant optique est représentée sur la figure 3.2. Il est à

noter qu'il n'existe aucune frontière distincte et il peut y avoir des zones de transition entre chacune des deux couches de la figure 3.2.

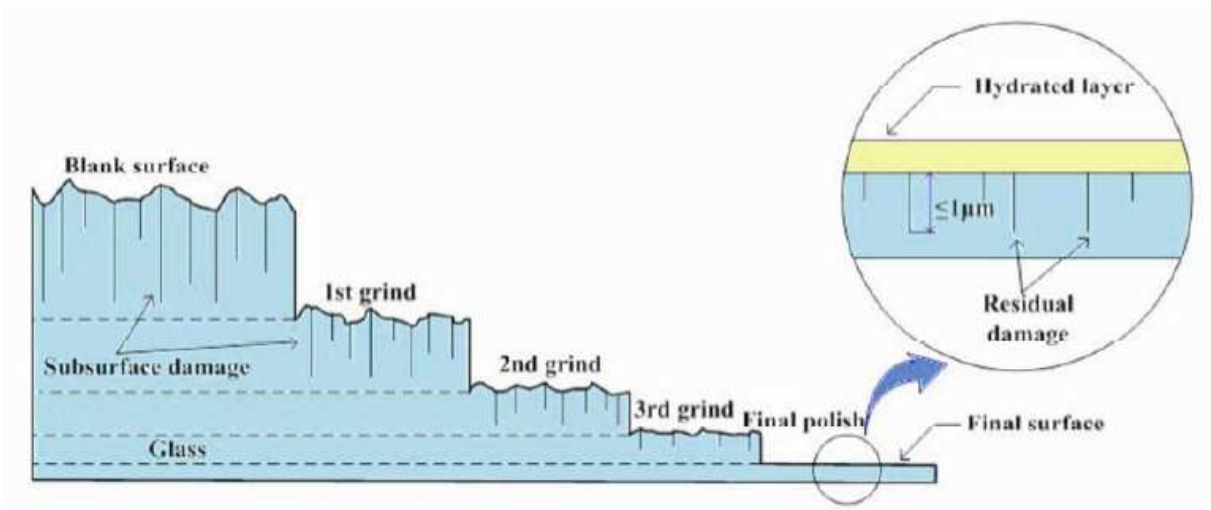



***Figure 3.2 :*** *Schéma des étapes successives de mise en forme jusqu'au polissage d'un composant optique (Campbell H. 2002)*

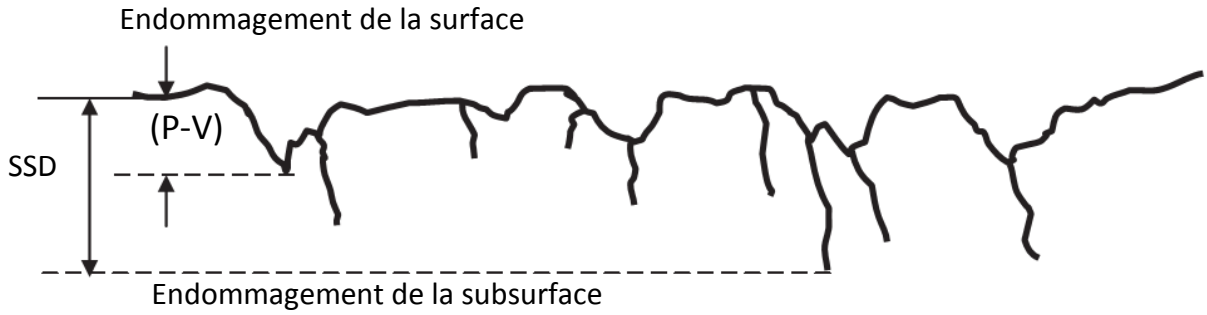



***Figure 3.3 :*** *Illustration schématique de la couche endommagée Subsurface Damage SSD (Belkhir N. et al. 2011)*

Les recherches sur l'endommagement de la couche endommagée remontent au début du 20ème siècle, quand Rayleigh et Preston ont utilisés l'acide fluorhydrique pour éroder le verre (Preston F.W. 1922; Rayleigh L. 1917). Preston a attaqué chimiquement un verre meulé, il a trouvé que la surface attaquée est pleine de piques et de vallées, il a cru que l'origine de ces défauts a été laissée par l'opération de meulage. Ces défauts sont à présent référés comme la couche endommagée *SSD,* cette méthode est largement utilisée comme une technique d'inspection précise pour évaluer la SSD jusqu'à aujourd'hui.

Depuis la découverte que l'attaque chimique modifie et altère inévitablement la surface du composant optique, des méthodes non destructives ont été proposés au cours des décennies passées. Les techniques non destructives sont basées sur le fait que les propriétés de détection de la lumière, ondes acoustiques, ondes électromagnétiques vont changer une fois qu'ils rencontrent les fissures de la subsurface quand ils pénètrent dans les matériaux testés (Mackerle J. 2004).

## 3.3. Méthodes destructives

Les méthodes destructives impliquent une modification physique dans les composants optiques, elles utilisent habituellement le polissage pour obtenir la morphologie de la couche endommagée SSD, car le polissage induit moins d'endommagement supplémentaire aux matériaux. Une autre forme de ces méthodes est l'attaque chimique, qui enlève la matière sans provoquer de nouvelles fractures. Ces techniques ont généralement besoin de microscopie pour faciliter les mesures, qui sont souvent longues et fastidieuses, mais elles sont beaucoup plus fiables et précises. Certaines méthodes seront discutées ci-dessous.

### 3.3.1. Technique de découpe d'interface collée (bonded interface sectioning technique) :

L'approche de cette méthode a été utilisée d'abord par Mulhearn et d'autre chercheurs pour examiner la couche endommagée SSD dans les composants optiques meulés, la SSD résultante de l'indentation et le scratch test (Helbawi H. et al. 2001; Mulhearn T.O. 1959). Deux échantillons avec formes et matériaux identiques sont collés ensembles en utilisant un adhésif pour former un seul bloc, les surfaces collées sont auparavant précédées par une opération de polissage (Figure 3.4). Le bloc combiné est meulé et rayé pour générer la couche endommagée SSD, après cela l'adhésif est enlevé chimiquement d'une façon à ne pas endommager la surface ou affecter la couche endommagée des composants optiques. Par la suite l'échantillon est attaqué chimiquement afin d'ouvrir les microfissures pour faciliter l'observation. Apres cela la SSD sera visible sur la surface latérale de l'échantillon et prête pour l'inspection. La SSD peut être examiné avec un microscope optique ou un microscope électronique à balayage MEB, etc. Cette technique permet une observation directe de la SSD par rapport à d'autres méthodes destructives, mais la surface doit être soigneusement polie / meulée afin d'éviter des endommagements supplémentaires en effectuant la mesure de la SSD souhaité.

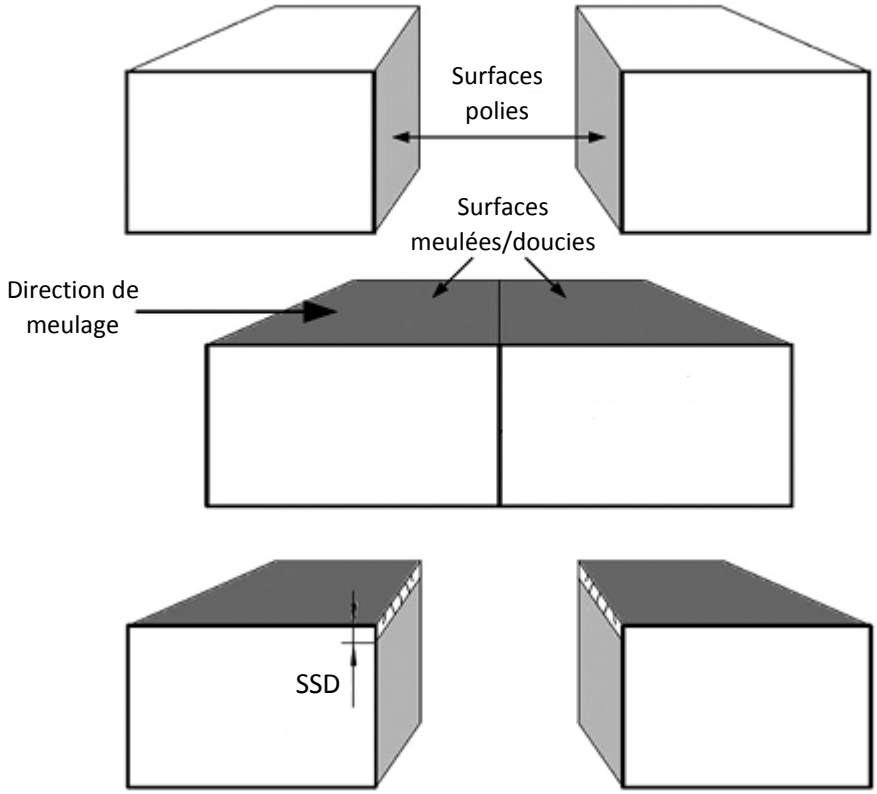



***Figure 3.4*** *Illustration schématique de la procédure de la technique de découpe d'interface collée (Dongxi Lv et al. 2013).*

### 3.3.2. Méthode d'attaque chimique :

Le développement récent de la méthode d'attaque chimique permet de mesurer les variations de la rugosité de la surface de la silice fondue meulée, avec le temps de l'attaque chimique ou le taux du matériau enlevé. En fonction de la corrosion chimique, la silice fondue sera isotropiquement attaqué par des molécules chimiques à l'interface entre la silice fondue solide et la solution. Par conséquent, les profils des microfissures seront agrandies littéralement (Wong L. et al. 2009). Ensuite l'évaluation des fissures élargies sera facile avec l'aide d'un profilomètre (Affatigato M. et al. 1996). La rugosité (P-V) de la surface mesurée augmente initialement et au bout de quelques minutes elle atteindra un plateau et se stabilisera, suivie d'une diminution en douceur avec le temps d'attaque chimique (Figure 3.5(a)) (Affatigato M. et al. 1996; Neauport C. et al. 2009). La rugosité de surface dans le plateau est considérée comme étant la couche endommagée, le procédé d'attaque chimique est également utilisé pour révéler les rayures et les creusés après le polissage du composant optique, qui sont dues

par la redéposition de la couche résultante de l'interaction entre le verre, la solution aqueuse et l'outil de polissage. (Carr J.W. et al. 1999a; Carr J.W. et al. 1999b)

En fait la rugosité de la surface mesurée doit être maintenue constante et avoir tendance à diminuer au-delà d'un temps/ épaisseur critique. Néanmoins, si on mesure la rugosité de surface avec un profilomètre de contact, il est fort probable de constater que la rugosité de surface augmente d'abord, puis tend vers la stabilité et baisse. Cela est dû au fait que le rayon de la pointe du stylet n'est pas infinitésimal qui se traduira par la petite mesure plausible de la rugosité de surface au stade initial (Figure 3.5(b)). En conséquence, les résultats prennent la forme d'un trapèze. Théoriquement, une pointe de stylet idéal donnera des résultats, que la rugosité de surface ne sera pas augmenter à la première étape de l'attaque chimique et diminuera au-delà d'une certaine épaisseur critique. (Wong L. et al. 2009)

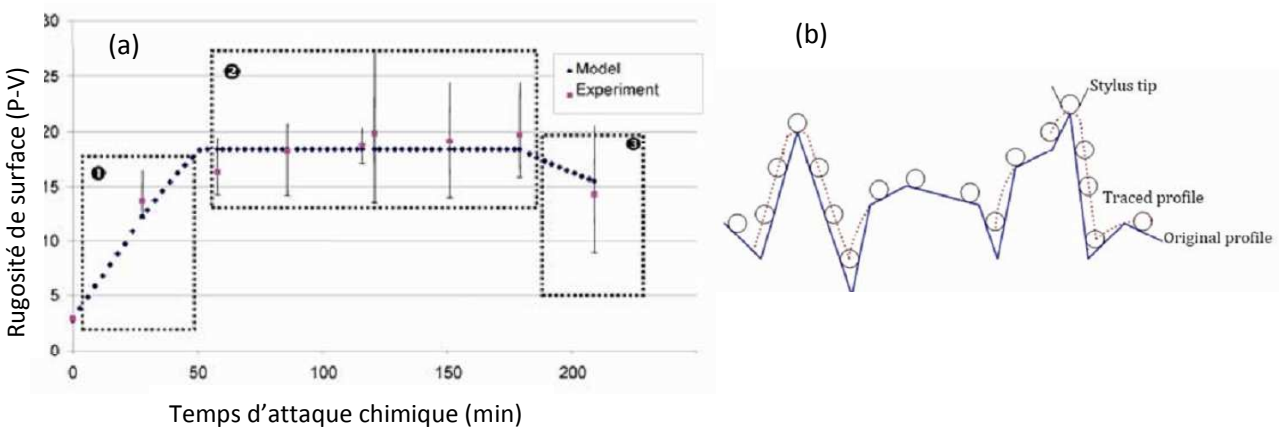



***Figure 3.5 :*** *La rugosité de surface avec l'attaque chimique. (a) la rugosité de surface (P-V). (b) le profil de surface réel et le profil mesuré avec un stylet de contact (Neauport C. et al. 2009).*

Il est également praticable de vérifier la cohérence de la vitesse d'attaque en fonction du temps ou de l'épaisseur du matériau attaqué pour déterminer l'endommagement de la couche fissurée. Les composants optiques meulés contiennent certainement d'innombrables microfissures et des contraintes à leurs pointes. Lorsque ces composants sont soumis à une attaque chimique, les fissures contenues dans la couche endommagée seront dissoutes plus rapidement que la matière, l'élargissement des fissures est accompagné par la libération des contraintes. Le contact réel diminue entre l'attaque chimique et le verre après un temps/épaisseur critique. A la fin, le taux se stabilisera. L'épaisseur attaquée chimiquement au cours de laquelle le taux tend à se stabiliser peut faire référence à la profondeur de SSD.

En dépit de la commodité du procédé chimique due à l'absence de polissage, les procédés d'attaque chimique sont applicables uniquement aux matériaux isotropes, car la vitesse d'attaque chimique et la rugosité de surface résultante des matériaux anisotropes ne sont pas seulement influencés par SSD, mais aussi par d'autres facteurs. En conséquence, le taux de l'attaque chimique et la rugosité de surface n'indiquerons pas la SSD d'une façon fiable.

### 3.3.3. Usinage ionique focalisé (FIB : Focused Ion Milling).

L'usinage ionique focalisé est utilisée pour révéler les fissures engendrées par les essais de scratch ou d'indentation (Bhattacharya S. et al. 2009; Inkson B.J. et al. 2001; Wu H.Z. et al. 2003). Cette technique a été d'abord appliquée aux dislocations, la phase et les changements structurels des céramiques et des métaux, et par la suite elle s'est étendu à des fissures induites par indentation en verre sodo-calcique (Elfallagh F. & Inkson B.J. 2009). La technique encourt des difficultés à observer une grande partie pour la raison qu'elle expose seulement une zone assez limitée pour les observateurs. La méthode tomographie d'usinage ionique focalisé 3D consiste à reconstruire une série d'images en 2D, crée avec un faisceau d'ions fortement focalisé et imagé avec des électrons secondaires induits par ions (ISE), puis les reconstruire avec des logiciels professionnels spécialisés. L'usinage ionique focalisé 3D est capable de quantifier la taille des fissures à haute résolution spatiale jusqu'à <100 nm, ce qui la rend une analyse idéale à un site spécifique et une technologie de nano-traitement.

### 3.3.4. Imprégnation de colorant :

Du fait que les composants optiques contiennent habituellement un grand nombre des micro fissures qui se propagent sous la surface, les colorants contrastants dans la couleur contre le substrat après avoir été irradié aux Rayon X, Laser, etc. (Kanematsu W. 2006; Kanematsu W. et al. 2001). Si le substrat est composé de matériaux de couleurs foncées, les colorants fluorescents peuvent être utilisés, ils sont visibles indépendamment de la couleur du substrat. Ensuite la SSD sera facilement inspecté optiquement ou électroniquement. Comme le colorant ne pourra pas s'infiltrer sur toute la profondeur de microfissures, il ne représente pas réellement la profondeur de la couche endommagée. Afin d'obtenir la profondeur de la microfissure aussi précise que possible, d'autres méthodes pour imprégner les colorants ont été proposées : pré charge mécanique (Saruki K. & Yamada A. 1995) et pression isostatique à froid (Kanematsu W. et al. 2001), la microsonde électronique ( *electron probe microanalysis EPMA*) a été utilisé pour sonder la trace du colorant dans une concentration extrêmement petite (Figure 3.6), une contrainte de pression est exercé sur le substrat pour ouvrir les microfissures, cette contrainte est réglée de sorte qu'elle ne dépasse pas la moitié de la

contrainte de rupture de substrat, à la suite de la charge, la décharge est appliquée immédiatement sans temporisation. On peut se demander si la méthode favorise la propagation des fissures au cours de processus de chargement / déchargement. (Choi S.R. & Salem J.A. 1996) ont montré que le pré chargement jusqu'à 90% de contrainte de rupture a peu d'influence sur le paramètre de fatigue (n) pour les matériaux les plus fragiles comme le verre et la céramique, et donc sur la propagation des fissures en raison que le préchargement peut être négligé. La pression isostatique à froid force le colorant à imprégner les microfissures par l'utilisation du fluide sous pression. L'air contenu dans les fissures sera dissipé par le fluide colorant injecté à haute pression (par exemple du Pd $(NO_3)_2$ solution). La technique est particulièrement favorable à l'ouverture des fissures peut profondes sur la surface des composants optiques meulés.

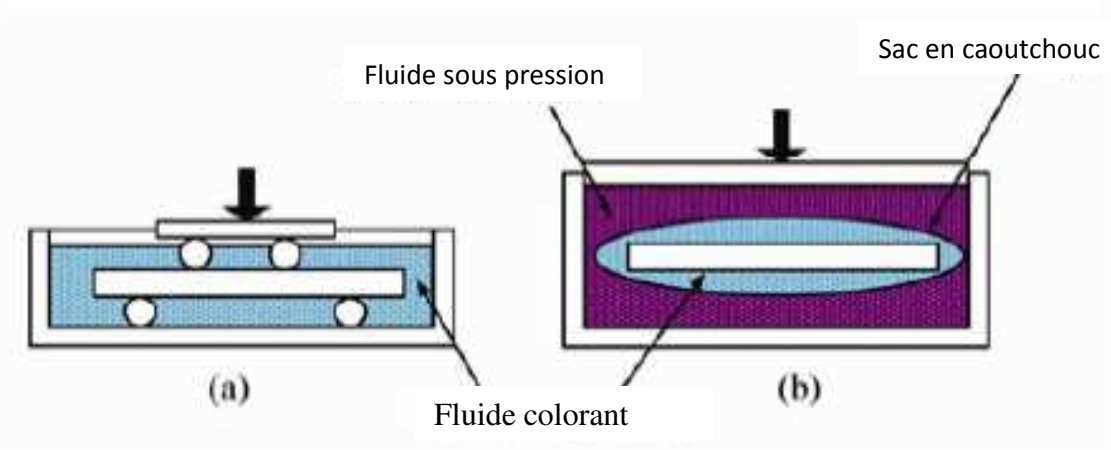



***Figure 3.6 :*** *deux méthodes d'imprégnation de colorant (a) méthode de précharge mécanique (b) méthode de pression isostatique à froid. (Kanematsu W. et al. 2001)*

### 3.4. Méthodes d'évaluation non destructive :

Les méthodes d'évaluation destructive, même si elles sont assez précises, elles prennent beaucoup de temps et de travail, elles inspectent seulement des zones localisées et la destruction de la pièce est inévitable, En conséquence, diverses méthodes ont été développées pour évaluer la SSD de façon non destructive et rapide, Les techniques qui seront décrites sont représentatives de nombreuses évaluations non destructives pour l'investigation de la SSD dans des substrats de verres.

### 3.4.1. Estimation de la SSD à partir de la rugosité de surface (P-V) et la taille des grains abrasives :

Il existe de nombreux résultats expérimentaux et plusieurs modèles de la relation entre SSD et SR de matériaux optiques. Les résultats expérimentaux indiquent une corrélation linéaire entre la profondeur de la SSD et la SR avec une constante de proportionnalité. Les valeurs de la constante de proportionnalité SSD/Rt qui ont été établis par des scientifiques pour différents matériaux sont répertoriées dans le tableau 1. A l'origine Preston (Preston F.W. 1922) était le premier à observer qu'un grand nombre de défauts laissés par l'opération de meulage s'étend à une profondeur de deux à trois fois plus grandes que celle du creux la plus profonde. Kachalov (Kachalov N.N. 1958) a rapporté que la profondeur de la couche endommagée est proportionnelle à la rugosité de la surface (P-V), il était le premier qui a obtenir une relation entre la SSD et la SR des composants optiques meulés, ensuite cette relation a été développée par d'autres chercheurs. (Hed P.P. & Edwards D.F. 1987; Hed P.P. et al. 1988; Lambropoulos J. C. et al. 1997; Lambropoulos J.C. et al. 1999b; Li D. et al. 2008; Miller P.E. et al. 2005; Neauport C. et al. 2009). Dans le meulage/doucissage des matériaux fragiles ou les grains abrasifs de grandes tailles sont utilisés, se comportent comme un indenteur qui glissent/roulent sur la surface du composant optique (voir figure 3.1). A cause de la charge et la décharge de l'indenteur, la sous surface se fracture lorsque la charge dépasse la valeur critique. La profondeur des fissures médianes peut être considérée comme la profondeur de la couche endommagée *(Subsurface Damage SSD),* tandis que les fissures latérales constitueront la rugosité de surface *(Surface Roughness SR)* après le meulage des matériaux fragiles. Ainsi on peut estimer les plages de la subsurface endommagée de certains matériaux sous certaines conditions une fois que la rugosité de surface est connue. Étant donné que la rugosité de surface peut être décrite par de nombreux paramètres (Rt, Rz, Ra, Rq etc.) (Gadelmawla E.S. et al. 2002), la relation entre la SSD et la rugosité de surface varie d'un paramètre à l'autre. La plupart des chercheurs ont mis une relation linéaire entre la SSD et la rugosité (P-V), tandis que Li et al ont trouvé une relation non linéaire entre la rugosité Rz et la SSD, (Li D. et al. 2008). Néanmoins, d'autres chercheurs affirment que la rugosité de surface (pic à vallée) est préférable par rapport à d'autre paramètres de la rugosité comme (RMS, Rq, Rz ou Ra) (Suratwala T. et al. 2006). Lambropoulos et al. ont montré que la profondeur de SSD ne dépasse pas deux fois la rugosité d'une surface bien meulée, (Lambropoulos J.C. et al. 1999a; Randi J.A. et al. 2005). Cependant, la qualité de surface ne peut pas être toujours un indicateur fiable de la SSD dans certains cas : les fissures peuvent s'étendre à un niveau beaucoup plus profond en dessous d'une surface lisse qu'une surface

rugueuse. En outre, la rugosité de surface est fortement influencée par l'appareil de mesure (Figure 3.4b) (Poon C.Y. & Bhushan B. 1995; Radhakrishnan V. 1970), par conséquent, le coefficient de proportionnalité varie d'un laboratoire à un autre.

Une autre estimation du SSD provient des abrasifs utilisés dans le meulage / rodage. Sur la base de nombreuses expériences dans les années 1930 ~ 1950, Katchalov (Kachalov N.N. 1958) a donné une relation linéaire simple entre SSD et la taille maximale des abrasifs utilisés. Sabia (Sabia R. et al. 1999) a déclaré dans son article que la SSD est proportionnelle à 5 fois le diamètre moyen des abrasifs avec le meulage par des abrasifs fixes tandis que, la proportionnalité varie de 1 ~ 1,8 fois la taille moyenne des abrasifs utilisés dans le meulage par des abrasifs libres. Ma et al (Ma B. et al. 2010) ont testé la SSD avec la microscopie confocale de diffusion et ils ont constatés que la profondeur du SSD était de 4 ~ 6 fois la taille des grains abrasifs. Après avoir expérimenté sur plusieurs types de verre et de céramique dans des conditions diverses, Lambropoulos a réduit la plage de la profondeur de SSD comme le montre la relation suivante (Lambropoulos J.C. 2000) :

$$0.3d^{0.68} < SSD < 2d^{0.85} \qquad (3.1)$$

Avec *d* est le diamètre du grain abrasif et la profondeur de la SSD est en µm.

Suratwala et al, (Suratwala T. et al. 2006) ont établies une corrélation entre la profondeur maximale de la SSD et la longueur moyenne de fissure qui peut servir de guide utile pour estimer la SSD et donc d'optimiser les processus de fabrication. L'évaluation de la SSD soit de la rugosité de surface et la taille des grains abrasifs ou bien de la largeur et la longueur des fissures dépend de la mesure de ces facteurs qui varies d'un chercheur a un autre et d'un instrument à un autre, bien que ces méthodes restent plus simple et plus économique.

***Tableau 1 :*** *Valeur de constante de proportionnalités de différents matériaux obtenus par plusieurs chercheurs.*

| | **SSD/$R_t$** | **Matériaux** |
|---|---|---|
| **Preston** *(Preston F.W. 1922)* | 3-4 | Verres |
| **Aleinikov** *(Randi J.A. et al. 2005)* | 3.9 ± 0.2 | Verres / Céramiques |
| **Miller et al.** *(Miller P.E. et al. 2005)* | 9.1 | Silice fondue |
| **Kachalov** *(Kachalov N.N. 1958)* | 3.7 ~4 | Verres |
| **Hed and Edwards** *(Hed P.P. & Edwards D.F. 1987)* | 6.4 ± 1.3 | BK7, silice fondue, Zerodur |
| **Lambropoulos** *(Lambropoulos J.C. et al. 1999b)* | <2 | Verres optiques |
| **Randi et al.** *(Randi J.A. et al. 2005)* | <1.4 | CaF2, MgF2 etc. |
| **Neauport et al.** *(Neauport C. et al. 2009)* | 3.3 ± 0.5 | Silice fondue |

### 3.4.2. Diffusion laser et microscopie confocale :

La diffusion laser, l'une des méthodes de caractérisation non destructive, a d'abord étudiée la qualité des surfaces, puis étendue à la caractérisation de la subsurface (Wu Z.L. et al. 1999), Quand un faisceau de lumière pénètre dans une surface transparente ou translucide, la diffusion optique aura lieu à la fois sur la surface et sous la surface en raison des défauts de la surface et de la subsurface. La lumière réfléchie, la lumière transmise, la lumière diffusée et la lumière diffusée de la subsurface apparaissent ensemble. Par conséquent, il est essentiel de distinguer la lumière diffusée de la subsurface de celle réfléchie / diffusée de surface. A cet effet, un laser polarisé et un analyseur de polarisation sont adoptés, ce qui est considéré comme technique de polarisation croisée. Dans un système de diffusion de laser, un détecteur est placé afin de détecter et d'enregistrer la diffusion de la couche endommagée SSD. Ensuite, la profondeur de la SSD peut être grossièrement déterminée par l'intensité de la diffusion et la variation de l'angle de polarisation. Cependant, cette technique ne peut pas fournir une connaissance précise de la profondeur des défauts étant donné que le détecteur reçoit toute la lumière diffusée mesurable. Mais ce problème peut être surmonté en incorporant un microscope confocal dans le système de diffusion laser. Sun et al, ont combinés la diffusion laser de polarisation croisée et la microscopie confocale pour détecter l'endommagement de la subsurface de matériaux transparents et épais avec une résolution de <1 µm de profondeur (Lu W.K. et al. 2006). Lu et al, ont utilisé un système similaire, microscopie confocale de polarisation croisée, pour mesurer la SSD du wafers de silicium meulés (Ellingson W.A. et al. 1993). L'utilisation d'un laser polarisé (laser He-Ne: @ 633 nm) et un miroir semi-réfléchissant polarisant différencie ce système d'un microscope confocale classique. Toute la lumière diffusée à partir de la surface ne changera pas de polarisation alors que celle diffusée par la SSD sera réfléchie et réfractée et donc dépolarisée en raison de discontinuités comme les microfissures. La lumière diffusée à partir de la SSD sera dirigée vers le détecteur d'enregistrement précédé d'un sténopé en acier inoxydable et un filtre (voir figure 3.6). Dû au fait que la surface rugueuse peut altérer la polarisation de la lumière diffusée, ce système n'est pas bien adapté au substrat avec une surface assez rugueuse. En outre, il est nécessaire que le matériau à tester soit transparent ou translucide, par rapport à la lumière incidente.

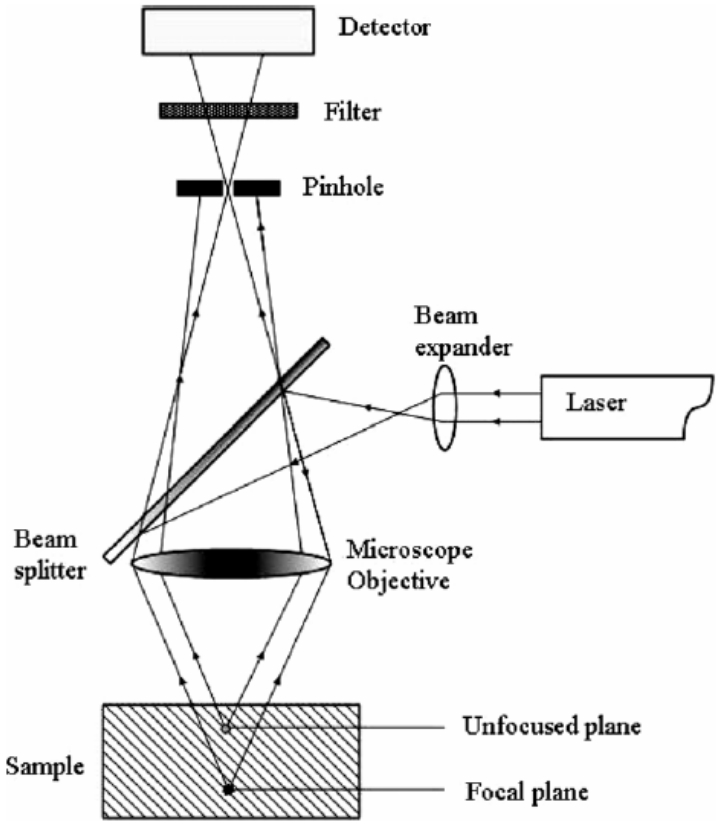



***Figure 3.6 :*** *Schéma d'un système de diffusion laser (Wu Z.L. et al. 1999)*

La microscopie confocale a été initialement utilisé pour visualiser des échantillons en biologie, Ce n'est qu'en ces dernières années que, cette technique avancée a été appliquée aux matériaux technologiques tels que les verres et les céramiques et à la mesure de la largeur des couches dans la fabrication des semi-conducteurs (Tata B. & Raj B. 1998). Le découpage optique et la reconstruction en trois dimensions des matériaux peuvent être réalisés avec cette technique car la lumière réfléchie ou diffusée en dehors du plan focal est bloquée dans le système optique, La microscopie confocale à balayage laser peut être utilisé pour acquérir des informations de subsurface de matériaux céramiques opaques (Winn J. & Yeomans J. A. 1996). La structure de la SSD d'une profondeur de 20 µm au-dessous de la surface peut être obtenue pour certaines céramiques. Neauport et al. ont discuté sur l'application de la microscopie par fluorescence confocale à l'observation de la SSD du substrat optique meulé (Neauport J. et al. 2009). Cette technique nécessite un prétraitement de la surface opposée du substrat pour représenter les endommagements de la subsurface nettement lorsque la rugosité de la surface à observer est très élevée. L'image sera floue avec l'augmentation de la rugosité de surface jusqu'à ce que le microscope soit incapable de donner des détails sur l'endommagement de la SSD. Comparativement, la technique est compliquée et prend

beaucoup de temps, et parfois, par exemple, si la surface est très rugueuse, la profondeur de la SSD ne peut même pas être acquis. Derndarsky et Oklind ont également démontré que l'endommagement de la SSD dans le quartz peut être démontré sous le mode fluorescent du microscope confocal à balayage laser en combinaison avec les colorants pour intensifier la lumière fluorescente de manière à rendre les fissures sous la surface, visibles et détectables (Derndarsky M. & Ocklind G. 2001). Fine et al, ont rapportés un microscope confocal à balayage laser récemment amélioré qui peut directement et facilement inspecter la SSD des composants optiques soit polis ou doucis (Fine K.R. et al. 2005), la figure 3.7 montre le principe de cette technique.

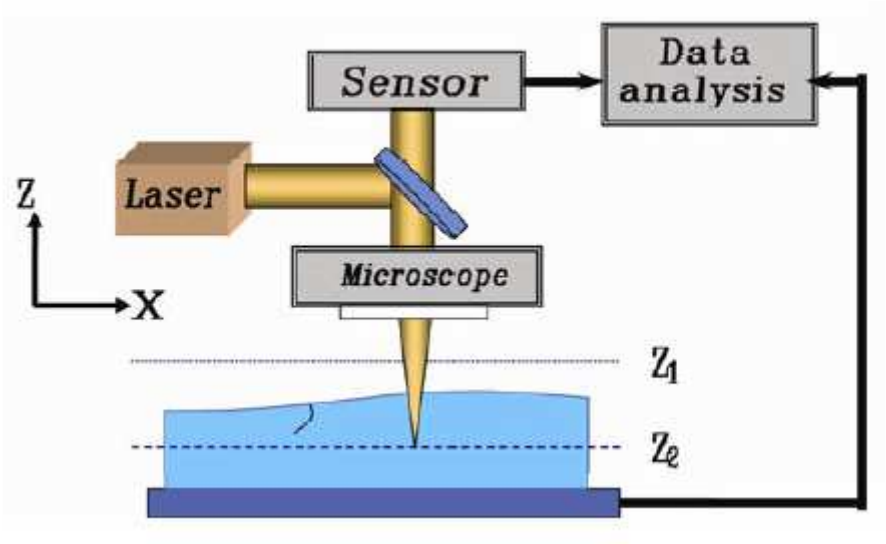



***Figure 3.7 :*** *Le principe de la microscopie confocale développé par Agilent. (Fine K.R. et al. 2005)*

Le microscope confocal à balayage laser est adopté en mode balayage de surface, mais le plan focal est situé à l'intérieur du substrat optique au lieu de la surface. Lors du balayage du substrat à la verticale (direction Z), le profil 3D du substrat optique est créé. En outre, la résolution de 150 nm a été atteinte, qui est lié aux paramètres du microscope, telles que l'ouverture numérique, la longueur d'onde utilisée, etc… ; cette technique est assez pratique, mais elle nécessite des exigences de surface comme la méthode de Neauport, qui, lorsque la surface du substrat est rugueuse, le système de mesure est incapable de tester le SSD. La microscopie confocale a également été employé pour étudier les mécanismes d'endommagement de la silice fondue lorsqu'elle est soumise à des impulsions laser intenses

(Bertussi B. et al. 2009). Les morphologies de surface et subsurface sont explorées avec une microscopie confocale avec une résolution de 1 micron et 0,26 microns dans des directions verticales et transversales, respectivement.

### 3.4.3. Microscopie à réflexion interne totale (MRIT)

La microscopie à réflexion totale interne est une autre méthode d'inspection non destructive pour les surfaces et les subsurfaces, qui démontre la possibilité d'évaluer les endommagements résiduels de polissage, les inclusions des composants optiques revêtues, et les sites de diffusion conduisant probablement à l'endommagement des composants optiques laser (Sheehan L.M. et al. 1998), la MRIT appartient aussi aux techniques de diffusion laser. La configuration du MRIT initialement conçu par Temple (Temple P.A. 1981) est représentée sur la figure 3.8.

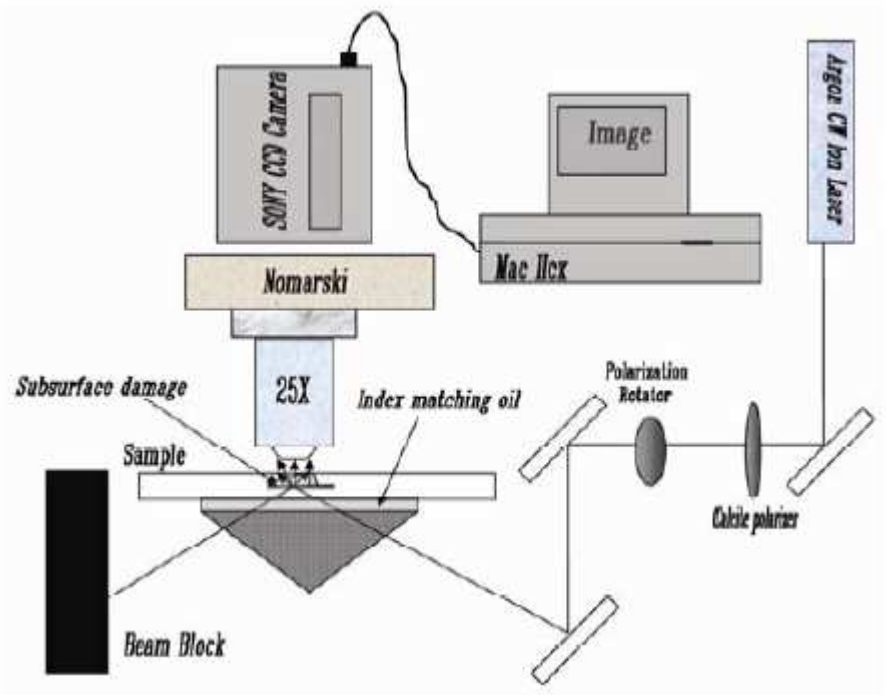



***Figure 3.8 :*** *Configuration de la microscopie à réflexion totale interne (Sheehan L.M. et al. 1998).*

Un faisceau laser est polarisé linéairement, après son passage à travers un polariseur, la lumière polarisée S voulue est distinguée en raison de la diffusion plus forte que la lumière polarisée P. Ensuite, le faisceau laser sera dirigé par des miroirs et des lentilles est incident sur la surface à contrôler en le faisant passer à travers la surface inférieure ou latérale de

l'échantillon (figure 3.8) selon un angle qui remplit les exigences d'une réflexion interne totale. Quand il n'y a pas de défauts dans l'échantillon ou sur la surface de l'échantillon, la lumière laser est réfléchie totalement par l'interface air-verre. Cependant, lorsque la lumière laser est diffusée en présence de défauts, la lumière diffusée sera transmise à travers la surface supérieure. Si un dispositif de détection est placé pour recueillir la lumière diffusée, les défauts seront visualisés, Les défauts de surface et se subsurface dans l'échantillon sont détectés simultanément. Ainsi, une question se pose : comment différencier les défauts de la subsurface de celles de surface ? un logiciel de contraste interférentiel différentiel publié par l'Institut national de la santé (NIH), est maintenant disponible pour résoudre ce problème . En outre, parce que les défauts sont généralement situés dans différentes profondeurs, les images de sites de diffusion seront légèrement hors-foyers qui sont quelque peu plus grands que la taille réelle des défauts. La MRIT éprouve à ce jour des difficultés à quantifier avec précision la profondeur / taille des défauts,ce qui nécessite un examen plus approfondi. En plus, la MRIT exige que les échantillons possédant des surfaces de haute qualité de façon à minimiser la diffusion de la lumière laser et que l'échantillon soit transparent par rapport à la lumière incidente, ce qui limite la MRIT d'être appliqué dans des domaines plus larges.

La détection d'intensité de la microscopie à réflexion interne totale (iTIRM) a été récemment mis au point par un groupe de recherche dans les Pays-Bas comme un outil pour le contrôle du processus de polissage en mesurant la rugosité de surface et les défauts de subsurface des composants optiques en cours de traitement, (Van der Bijl R. et al. 1999), Ils ont intégrés avec succès le système dans le polissage afin de déterminer si le processus de polissage devrait être arrêté ou non, ce qui rend le polissage plus rentable en gagnant du temps tous en garantissant de meilleures composants optiques.

### 3.4.4. Tomographie par cohérence optique (TCO) :

La tomographie par cohérence optique (TCO) a d'abord été utilisée pour observer les tissus biologiques, elle peut fournir des images en coupe transversale de la structure des tissus internes, ensuite, l'application de TCO a été étendue à des matériaux céramiques (Huang D. et al. 1991; Swanson E.A. et al. 1992).

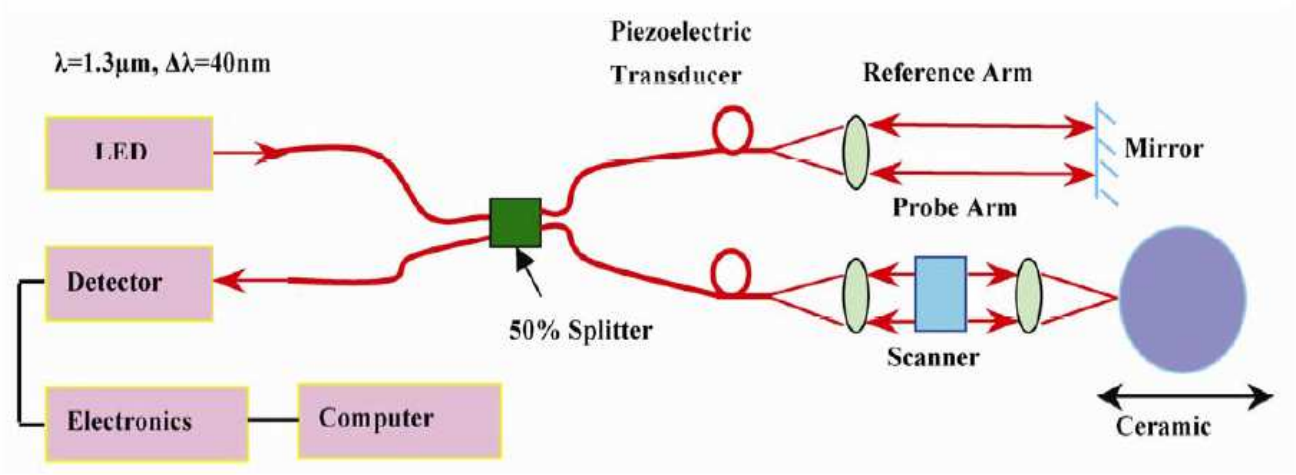



***Figure 3.9 :*** *Représentation schématique du système de balayage TCO (Bashkansky M. et al. 1997)*

Les impulsions laser ultra-courtes et la lumière à basse cohérence peuvent être utilisées comme sources de lumière en TCO pour évaluer la structure interne des échantillons. Contrairement à la microscopie confocale dont la résolution est limitée par l'ouverture numérique, la résolution en profondeur de la TCO repose sur la longueur de cohérence de la source lumineuse (Fujitomo J.G. et al. 1986).

$$\left(\Delta L = \ln(2)\frac{2}{\pi}\frac{\lambda^2}{\Delta\lambda}\right) \qquad (3.2)$$

Par conséquent, la lumière à basse cohérence telle que la diode électroluminescente (LED) est préférable, afin d'améliorer la résolution en profondeur. En raison que la lumière se déplace à des vitesses différentes dans les échantillons que dans l'air, l'indice de réfraction de l'échantillon doit être pris en considération pour obtenir la profondeur physique réelle dans les échantillons. En utilisant cette technique les défauts ayant une profondeur jusqu'au 500 µm peuvent être détectés. En outre, la TCO en principe, peut être appliqué à l'examen de la biréfringence induite par le stress dans la subsurface des matériaux car elle est naturellement sensible aux biréfringences (Stifter D.P. et al. 2003)

Guss et al. ont construit le long de la distance de travail une TCO 3D afin de contrôler le post-traitement par le laser CO2 des composants optiques en silice fondue endommagée (Guss G.M. et al. 2008). D'une manière générale, au-dessous des cratères provoqués par des impulsions laser de haute énergie il existe de nombreuses fissures dues à la rupture mécanique. Afin d'éliminer ces endommagement le traitement par le laser CO2 est utilisé en

raison de son effet de chaleur, la TCO est utilisé lors du traitement pour la présence de fissures. Cette configuration fonctionne bien à une distance de 50 mm et peut détecter les fissures au micron prés.

## 3.5. Autres méthodes :

### 3.5.1. Interféromètre de la lumière blanche amélioré :

Steinert et al. ont signalés qu'un interféromètre de lumière blanche amélioré, qui est généralement utilisé pour vérifier la qualité de surface, peut être utilisé pour détecter les fissures latérales de la SSD (Wuttig A. et al. 1999). Ils ont crus que la plupart des fissures latérales de la subsurface sont ouverts et à peu près parallèles à la surface de l'échantillon et la lumière incidente peut être réfléchie légèrement. De ce fait, la profondeur des fissures est calculée en divisant la différence du chemin optique (DCO) entre la surface et les fissures par l'indice de réfraction du substrat. Cette méthode permet également de détecter l'OPD en raison de la contrainte résiduelle induite par la fabrication. Néanmoins, cette méthode pourrait être inadaptée lorsqu'elle est utilisée pour mesurer les fissures médianes qui sont essentiellement normale à la surface de l'échantillon. Les fissures médianes dominent la résistance des échantillons et se propagent bien plus profondément sous la surface de l'échantillon tandis que les fissures latérales relativement peu profondes déterminent l'enlèvement de matière et la rugosité de surface.

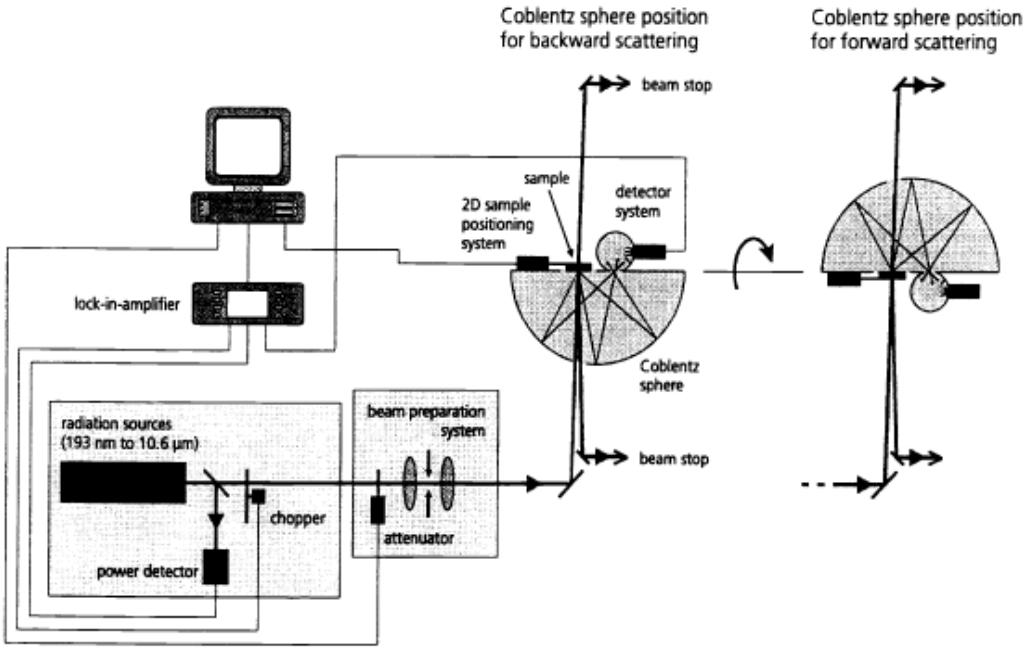



***Figure 3.10 :*** *Schéma de l'interféromètre de la lumière blanche amélioré (Wuttig A. et al. 1999).*

### 3.5.2. Points quantiques :

Afin de visualiser la subsurface dans les composants optiques doucis, Williams et al. ont ajoutés des points quantiques,( un type de particule fluorescente ~ 8 nanomètres ) pour les mettre en suspension au cours du doucissage (Williams W. et al. 2010), qui est en principe similaire à la méthode de Baspiking (Neauport J. et al. 2005), avec un liquide de fabrication contenant des colorants fluorescents. Ensuite, les pièces ont été observées avec un microscope à fluorescence à champ large (voir figure 3.11). Si le composant contient des endommagements de subsurface, les points quantiques pénètrent et s'intègrent dans les microfissures. Une fois que les endommagements sont éliminés, les points quantiques ne vont pas adhérer à la surface des composants optiques. Les profondeurs de pénétration des points indiquent la profondeur subsurface qui peut être visualisé à l'aide d'un microscope confocal. Cependant la profondeur mesurée avec des points quantiques ne représente pas réellement la profondeur de la SSD car ils ne peuvent pas pénétrer le long de la fissure en raison de sa forme. Cette méthode permet d'évaluer la SSD à une profondeur qui ne dépasse pas les 10 microns,

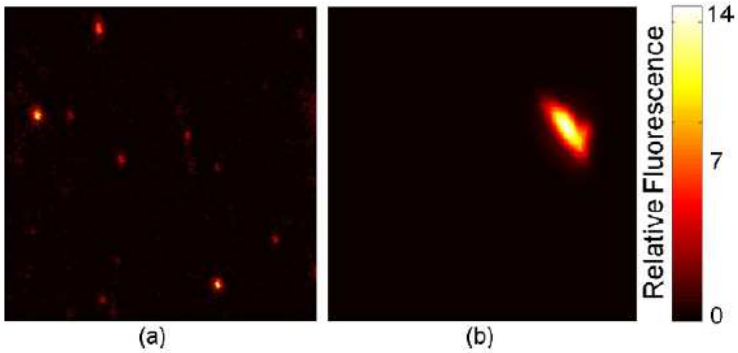



***Figure 3.11 :*** *(a) intensité de fluorescence d'un échantillon 40 µm x 40 µm douci et poli (b) similaire échantillon avec 5 min de temps de polissage supplémentaire (Williams W. et al. 2010).*

### 3.5.3. Technique de micro-indentation :

La surface des composants optiques meulée sera différente de celle qui n'a subie aucun traitement, en termes de propriétés physiques et mécaniques, Le procédé de micro-indentation profite de la différence de dureté de la couche de surface pour détecter la profondeur d'endommagement de subsurface (Yamada T. et al. 1999). Polvani et Evans (Polvani R.S. & Evans C.J. 1990) ont utilisés la micro-indentation pour étudier la SSD de la silice fondue

meulée. Ils ont trouvés que la dureté augmente progressivement avec l'augmentation de la profondeur de l'indentation. L'épaisseur de la couche ayant une dureté dégradée peut être appelée la profondeur de la SSD. Ce phénomène a été aussi observé par Paehler et al. pour des plaquettes de silicium meulées (wafers) (Paehler D. et al. 2007). Par ailleurs, Yang (Yang F. 2005) a systématiquement étudié l'influence des SSD sur des paramètres tels que la profondeur d'indentation maximale, module d'élasticité, etc., et il a constaté que la profondeur de l'indentation est maximale sous une charge donnée lorsque la SSD est profonde. Ces résultats sont, en effet en accord avec ceux de Paehler et al. Ce fait est indicateur de l'utilité de la dureté ou module d'élasticité comme un outil de mesure de SSD des composants optiques meulés. Cette technique peut évaluer la SSD aussi petite que quelques microns, mais néanmoins les résultats des tests ne sont pas fiables lorsque la SSD est inférieure à 1 µm.

### 3.6. Conclusion :

La SSD est en elle-même statistiquement significatif et le plus souvent la mesure de sa profondeur repose fortement sur les techniques d'évaluation spécifiques. En conséquence, les différentes méthodes donnent des profondeurs différentes de SSD. D'une manière générale, la méthode destructive peut donner des valeurs précises de la profondeur de SSD en raison de la résolution élevée par rapport aux techniques non destructives. Néanmoins, les méthodes d'évaluation non destructives sont plus faciles et plus rapides par rapport aux méthodes destructives, alors que la plupart des techniques non destructives sont d'une évaluation qualitative. En revanche, l'évaluation destructive peut fournir des informations directes, fiables et quantitatives d'endommagements de subsurface, mais elle rendra l'échantillon utilisable dans certains cas. Nous espérons que de nouvelles techniques non destructives et quantitatives pour évaluer les endommagements de la surface/subsurface apparaîtront à l'avenir avec les grands progrès de la science de l'optique, de la fabrication et des technologies de tests. L'objectif d'évaluation de la subsurface est de rendre les processus de fabrication, spécifiquement parlant, le meulage et le polissage plus efficace et plus économique, et d'ouvrir la voie à la réalisation de la " parfaite " surface des composants optiques. Les techniques non destructives sont relativement faciles à intégrer en cour de fabrication par rapport aux méthodes destructives, ce qui facilite les tests de la surface et de la subsurface pendant la fabrication des composants optiques.

## 3.7. Références bibliographiques :

Affatigato M., Osborne D.H. & Haglund Jr. R.F. 1996. Effect of Surface Roughness on the Acid Etching of Amorphous Silica. J. Am. Ceram. Soc. 79.688-94.

Bashkansky M., Duncan M.D., Hahn M., Lewis III D. & Reintjes J. 1997. Subsurface defect detection in ceramics by high speed high-resolution optical coherent tomography Opt. Lett. 22.61-63.

Belkhir N., Bouzid D., Lakhedari F., Aliouane T. & Raedlein E. 2011. Characterization of glass surface damaged by alumina abrasive grains. J Non Cryst Solids 357.2882-87.

Belkhir, N., D. Bouzid & V. Herold. 2009. Wear behavior of the abrasive grains used in optical glass polishing. Journal of Materials Processing Technology 209.6140-45.

Bertussi B., Cormont P., Palmier S., Legros P. & Rullier J. 2009. Initiation of laser-induced damage sites in fused silica optical components. Opt. Express 17.11469-79.

Bhattacharya S., Riahi A.R. & Alpas A.T. 2009. Indentation-induced subsurface damage in silicon particles of Al-Si alloys. Mater. Sci. Eng. A 527.387-96.

Bloembergen N. 1973. Role of cracks, pores, and absorbing inclusions on laser induced damage threshold at surfaces of transparent dielectrics. Appl. Opt. 12.661-64.

Brinksmeier E. 1989. State-of-the-art of non-destructive measurement of sub-surface material properties and damages. Prec. Eng. 11.211-24.

Buijs M. & Hounten K. K. 1993. A model for lapping of glass. J. Mater. Sci. 28.3014-20.

Campbell H. 2002. Damage resistant optical glasses for high power lasers: A continuing glass science and technology challenge. UCRL-JC-149843.

Carr J.W., Fearon E., Summers L.J. & Hutcheon I.D. 1999a. Subsurface damage assessment with atomic force microscopy. UCRL-JC-132385.

Carr J.W., Fearon E., Summers L.J., Hutcheon I.D., Haack J.K. & Hoskins S. 1999b. Subsurface structure in polished fused silica and diamond turned single crystal silicon. UCRL-JC-134512.

Choi S.R. & Salem J.A. 1996. Preloading technique in dynamic fatigue testing of glass and ceramics with an indentation flaw system. J. Am. Ceram. Soc. 79.1228-32.

Derndarsky M. & Ocklind G. 2001. Some preliminary observations on subsurface damage on experimental and archaeological quartz tools using CLSM and dye. J. Archaeol. Sci. 28.1149-58.

Dongxi Lv, Tang Y., Wang H. & Huang Y. 2013. Experimental Investigations On Subsurface Damage In Rotary Ultrasonic Machining Of Glass Bk7. Mach Sci Technol 17.443-63.

Elfallagh F. & Inkson B.J. 2009. 3D analysis of crack morphologies in silicate glass using FIB tomography. J. Euro. Ceram. Soc 29.47-52.

Ellingson W.A., Ayaz D.M., Brada M.P. & O'Connell W. 1993. Detection of subsurface defects in machined silicon nitride ceramics by optical scattering methods. Natl. Inst. Stand. Technol. Spec. Publ. 847.147–57.

Evans C.J., Paul E., Dornfeld D., Lucca D.A., Byrne G., Tricard M., Klocke F., Dambon O. & Mullany B.A. 2003. Material Removal Mechanisms in Lapping and Polishing. Ann. CIRP 152.611-33.

Fine K.R., Garbe R., Gip T. & Nguyen Q. 2005. Non-destructive, real-time direct measurement of subsurface damage. Proc. SPIE 5799.105-10.

Fujitomo J.G., De Silerstri S., Ippen E.P., Puliafito C.A., Margoli R. & Oseroff A. 1986. Femtosecond optical ranging in biological systems. Opt. Lett. 11.150-52.

Gadelmawla E.S., Koura M.M., Maksoud T.M.A., Elewa I.M. & Soliman H.H. 2002. Roughness parameters. Mater. Process. Technol. 123.133-45.

Golini D. & Jacobs S.D. 1991. Physics of loose abrasive microgrinding. Appl. Opt. 30.

Green R.E. 1990. Nondestructive Evaluation of Materials. Annu. Rev. Mater. Sci. 20.197-217.

Guss G.M., Bass I.L., Hackel R.P., Maihiot C. & Demos S.G. 2008. In situ monitoring of surface postprocessing in large-aperture fused silica optics with optical coherence tomography. Appl. Opt. Express 47.4569-73.

Hed P.P. & Edwards D.F. 1987. Optical glass fabrication technology. 2: Relationship between surface roughness and subsurface damage. Appl Opt 26.4677-80.

Hed P.P., Edwards D.F. & Davis J.B. 1988. Subsurface damage in optical materials: Origin, measurement & removal. UCRL-99548.

Helbawi H., Zhang L. & Zarudi I. 2001. Difference in subsurface damage in indented specimens with and without bonding layer. Int. J. Mech. Sci. 43.1107-21.

Hellier C.J. 2003. Handbook of nondestructive evaluation New York: The McGraw -Hill Companies Inc.

House R.A., Bettis J.R. & Guenther A.H. 1977. Subsurface structure and laser damage threshold. IEEE J. Quant. Electr 13.363-65.

Huang D., Swanson E.A., Lin C.P., Schuman J.S., Stinson W.G., Chang W., Hee M.R., Flotte T., Gregory K., Puliafito C.A. & Fujimoto J.G. 1991. Optical coherence tomography. Science 254.1178-81.

Inkson B.J., Mulvihill M. & Mobus G. 2001. 3D determination of grain shape in a FeAl-based nanocomposite by 3D FIB tomography. Scripta Mater 45.753-58.

Izumitani T. & Harada S. 1971. 'Polishing mechanism of optical glasses. Glass Technol 12.131-35.

Jacobs S.D., Arrasmith S.R., Kozhinova I.A., Gregg L.L., Shorey A.B., Romanofsky H.J. & Golini D. 1999. MRF: Computer Controlled Optics Manufacturing. Am. Ceram. Soc. Bulletin 78.42-48.

Jacobs S.D., Kordonski W., Prokhorov I.V., Golini D., Gorodkin G.R. & Strafford T.D. 1998. Deterministic magnetorheological finishing. In *US Patent* (ed.) 5795212.

Kachalov N.N. 1958. Technology of grinding and polishing sheet glass in Russian. [translated by W. Mao and Y. Yang, 141-142 (China Industry Press, Peking, 1965) in Chinese).].

Kanematsu W. 2006. Visualization of subsurface damage in silicon nitride from grinding by a plasma etching and dye impregnation method. J. Am. Ceram. Soc. 89.2564-70.

Kanematsu W., Sando M., Ives L.K., Marinenko R. & Quinn G.D. 2001. Dye Impregnation Method for Revealing Machining Crack Geometry. J. Am. Ceram. Soc. 84.795–800.

Kasai T. 2000. Machining and processing technologies and quality of silicon wafer surfaces. J. Surf. Sci. Soc. Jpn. 21.688-95.

Lambropoulos J. C., Jacobs S. D., Gillman B., Yang F. & Ruckman J. 1997. Subsurface damage in microgrinding optical glasses. LLE Review 73.45-49.

Lambropoulos J.C. 2000. From abrasive size to subsurface damage in grinding. Convergence 8.1-3.

Lambropoulos J.C., Jacobs S.D. & Ruckman J. 1999a. Material removal mechanisms from grinding to polishing. Ceram. Trans. 102.113-28.

Lambropoulos J.C., Li Y., Funkenbusch P. & Ruckman J. 1999b. Non-contact estimate of grinding-induced subsurface damage. Proc of SPIE 3782.41-50.

Lawn B.R. & Marshall D.B. 1979. Hardness, toughness, and brittleness: An indentation Analysis. J. Amer. Ceram. Soc. 62.347-50.

Li D., Wang Z. & Wu Y. 2008. Relationship between subsurface damage and surface roughness of optical materials in grinding and lapping processes. J Mater Process Technol 205.34-41.

Lu W.K., Sun J.G. & Pei Z.J. 2006. Subsurface damage measurement in silicon wafers with cross-polarisation confocal microscopy. Int. J. Nanomanufacturing 1.272-82.

Lucca D.A., Brinksmeierm E. & Goch G. 1998. Progress in assessing surface and subsurface integrity. Ann. CIRP 47.669-93.

Ma B., Shen Z., He P., Ji Y., Sang T., Liu H., Liu D. & Wang Z. 2010. Detection of subsurface defects of fused silica optics by confocal scattering microscopy. Chin. Opt. Lett. 8.296-99.

Mackerle J. 2004. ''Finite-element modeling of non-destructive material evaluation, an addendum: a bibliography (1997-2003). Modelling Simul. Mater. Sci. Eng. 12.799-834.

Malkin S. & Hwang T.W. 1996. Grinding mechanisms for ceramics. Ann. CIRP 45.569–80.

Miller P.E., Suratwala T.I., Wong L.L., Feit M.D., Menapace J.A., Davis P.J. & Steele R.A. 2005. The distribution of subsurface damage in fused silica. Proc. SPIE 5991, 599101.

Mulhearn T.O. 1959. The deformation of metals by Vickers-type pyramidal indenters. J. Mech. Phys. Solids 7.85-96.

Neauport C., Ambard P., Cormont N., Darbois J., Destribats C., Luitot & Rondeau O. 2009. Subsurface damage measurement of ground fused silica parts by HF etching techniques. Opt. Express 17.20448-56.

Neauport J., Cormont P., Legros P., Amdard C. & Destribats J. 2009. Imaging subsurface damage of grinded fused silica optics by confocal fluorescence microscopy. Opt. Express 17.3543-54.

Neauport J., Lamaignere L., Bercegol H., Pilon F. & Birolleau J.C. 2005. Polishing-induced contamination of fused silica optics and laser induced damage density at 351 nm. Opt. Express 13.10163-71.

Paehler D., Schneider D. & Herben M. 2007. Nondestructive characterization of sub-surface damage in rotational ground silicon wafers by laser acoustics. Microelectronic Engineering 84.340-54.

Pollicove H. & Golini D. 2003. Deterministic manufacturing processes for precision optical surfaces. Key Eng. Mat. 238-239,.53-58.

Polvani R.S. & Evans C.J. 1990. Microindentation as a technique for assessing subsurface damage in optics. Natl. Inst. Stand. Technol. Spec. Publ. 801.25-38.

Poon C.Y. & Bhushan B. 1995. Comparison of surface roughness measurements by stylus profiler, AFM, and non-contact optical profiler. Wear 90.76-88.

Preston F.W. 1922. The structure of abraded glass surfaces. Tran. Opt. Soc. 23.141-64.

Radhakrishnan V. 1970. Effect of stylus radius on the roughness values measured with tracing stylus instruments. Wear 16.325-35.

Randi J.A., Lambropoulos J.C. & Jacobs S.D. 2005. Subsurface damage in some single crystalline optical materials. Appl. Opt. 44.2241-49.

Rayleigh L. 1917. Polish. Nature 64.385-88.

Sabia R., Stevens H.J. & Varner J.R. 1999. Pitting of a glassceramic during polishing with cerium oxide. J. Non-Crystal. Solids 249.123-30.

Saruki K. & Yamada A. 1995. Observation of grinding damage and bending strength of ceramics. J. Soc. Mat. Sci. Jpn 44.927-32.

Sheehan L.M., Kozlowski M. & Camp D.W. 1998. Application of total internal reflection microscopy for laser damage studies on fused silica. Proc. SPIE 3244.282-95.

Shen J., Liu K., Yi H., He J., Shao & Fan Z. 2005. Subsurface damage in optical substrates. optik 116.288-94.

Stifter D.P., Burgholzer, Hoglinger O., Gotzinger E. & Hitzenberger C.K. 2003. Polarisationsenstitive optical coherence tomography for material characterisation and strain-field mapping. Appl. Phys. A 76.947-51.

Suratwala T., Wong L., Miller P., Feit M. D., Menapace J., Steele R., Davis P. & Walmer D. 2006. Sub-surface mechanical damage distributions during grinding of fused silica. J. Non-Crystal. Solids 352.5601-17.

Swanson E.A., Huang D., Hee M.R., Fujitomo J.G., Lin C.P. & Puliafito C.A. 1992. Highspeed optical coherence domain reflectometry. Opt. Lett. 17.151-53.

Tata B. & Raj B. 1998. Confocal laser scanning microscopy: Applications in material science and technology. Bull. Mater. Sci. 21.263-78.

Temple P.A. 1981. Total internal reflection microscopy: a surface inspection technique. Appl. Opt. 20.2656-64.

Van der Bijl R., Fahnle O.W. & Van Brug H. 1999. Subsurface damage measurements as a tool for process monitoring. in Proceedings of the ASPE Annual Meeting, .606–09.

Verma Y., Chang A.K., Berrett J.W., Futtere K., Gardopee G.J., Kelley J. & Kyler T. 2006. Rapid damage-free shaping of silicon carbide using Reactive Atom Plasma (RAP) processing. Proc. SPIE 6273, 62730B.

Williams W., Mullany B., Parker W., Moyer P. & Randles M. 2010. Using quantum dots to evaluate subsurface damage depths and formation mechanisms in glass. CIRP Annals - Manufacturing Technology 59.569-72.

Winn J. & Yeomans J. A. 1996. A study of microhardness indentation fracture in alumina using confocal scanning laser microscopy. Philos. Mag. A 74.1253-63.

Wong L., Suratwala T., Feit M.D., Miller P.E. & Steele R. 2009. The effect of HF/NH4F etching on the morphology of surface fractures on fused silica. J. Non-Crystal. Solids 355.797-810.

Wu H.Z., Roberts S.G., Möbus G. & Inkson B.J. 2003. Subsurface damage analysis by TEM and 3D FIB crack mapping in alumina/5 vol.%SiC nanocomposites. Acta Mater 51.149–63.

Wu Z.L., Feit M.D., Kozlowski M.R., Rubenchik A.M. & Sheehan L. 1999. Laser modulated scattering as a nondestructive evaluation tool for optical surfaces and thin film coatings. Proc. SPIE 3578.721-29.

Wuttig A., Steinert J., Duparre A. & Truckenbrodt H. 1999. Surface roughness and subsurface damage characterization of fused silica substrates. Proc. SPIE 3739.369-76.

Yamada T., Morita N. & Yoshida Y. 1999. Newly developed microindentation and scratch tester for measuring sub-surface damaged layer. Journal of the Japan Society of Precision Engineering 65.131-35.

Yang F. 2005. Effect of subsurface damage on indentation behavior of ground ULETM glass. J. Non-Crystal. Solids 351.3861-65.

Zhang W. & Zhu J. 2009. Controlling subsurface damage in neodymium doped phosphate glass. optik 120.752-57.

# IV Etudes expérimentales et discussions

*"Dix mille difficultés ne font pas un doute"*

*Isaac Newton*

*(1642 - 1727)*

## 4. Etudes expérimentales et discussions :

### 4.1. Introduction :

Le meulage est généralement considéré comme l'une des techniques les plus efficaces et les plus rentables pour la fabrication des composants optiques. Cependant, en raison de la nature dure et fragile du verre optique, les échantillons meulés contiennent souvent des microfissures qui se propagent depuis la surface meulée, dans une couche appelée communément (Subsurface Damaged SSD) comme le montre la figure 4.1. Cette couche affecte fortement la résistance mécanique ainsi que la qualité optique des verres. De ce fait, il est très utile de comprendre l'influence des paramètres de meulage, par exemple : la profondeur de coupe, la vitesse de coupe, les avances etc. sur la profondeur de la SSD générée. Cependant, la mesure non-destructive et l'évaluation rapide de la SSD est très difficile car elle est cachée sous la surface meulée. D'autre part, la rugosité de surface (Surface Roughness SR) est l'une des caractéristiques les plus importantes de la surface meulée, cette dernière est très pratique à mesurer. Par conséquent, si la relation entre SSD et SR est établie, la SSD peut être évalué rapidement et avec précision par SR. (Hu P. et al. 2002).

Pour parvenir à l'information fondamentale des caractéristiques de la SSD induite par le meulage assisté par ultrasons (Ultrasonic Assisted Grinding UAG) ou le meulage conventionnel (Conventional Grinding CG) des études expérimentales ont été systématiquement effectuées par des chercheurs dans le monde entier.

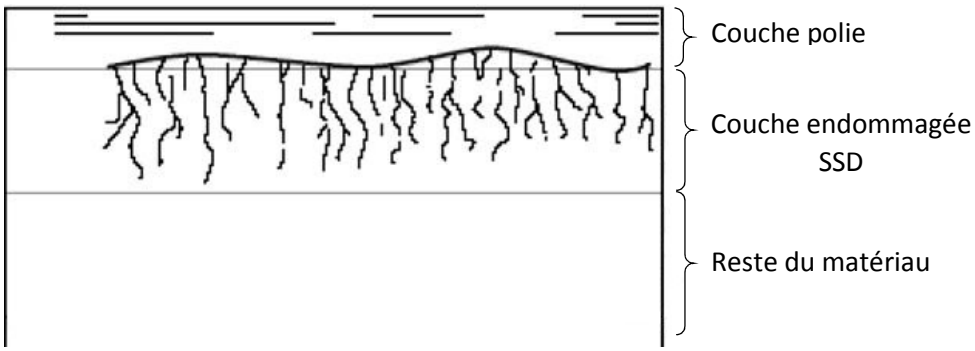



***Figure 4.1 :*** *illustration schématique de la couche endommagée SSD.*

Afin d'augmenter la résistance mécanique et la durée de vie des composants optiques, les paramètres du processus d'usinage doivent être optimisés pour diminuer la profondeur de la couche endommagée SSD ainsi que la réduction de la durée des étapes de finition qui prennent en générale beaucoup de temps.

Le présent travail vise à étudier la couche endommagée SSD et la qualité de surface générée lors du meulage conventionnel (Conventional Grinding CG) et du meulage assisté par ultrasons (Ultrasonic Assisted Grinding UAG) de la vitrocéramique Zerodur® et le verre sodocalcique. Le but est de déterminer le processus le plus approprié d'usinage d'une part, et d'autre part de concevoir une nouvelle méthode destructive afin de calculer la profondeur de la couche endommagée en se basant sur la relation que l'on a établie entre la contrainte à la rupture et la profondeur de la SSD dans une courbe appelée la courbe d'étalonnage, et à partir de cette courbe on peut déduire la SSD du verre douci ou meulé soumis à l'essai de flexion à quatre points.

Ce chapitre est divisé en deux grandes parties, la première est consacrée à l'étude de l'effet de l'assistance ultrasonique sur la subsurface ainsi que sur la rugosité de surface de la vitrocéramique Zerodur® tandis que, la deuxième partie consiste à déterminer une relation entre la résistance mécanique et la profondeur de la couche endommagée du verre sodocalcique, il s'agit d'une nouvelle méthode destructive pour évaluer la profondeur de la SSD.

### 4.2. Matériaux utilisés et procédures expérimentales :

Dans ce travail nous avons utilisés deux types de verre le premier est la vitrocéramique Zerodur® (SCHOTT AG) dont les propriétés physiques sont indiquées dans le tableau 4.1. Des échantillons de ce verre, avec des dimensions de 25 mm de diamètre et de 12 mm d'épaisseur ont été choisis pour cette étude. Comme illustré sur la figure 4.2, l'outil est une meule boisseau diamanté, d'un diamètre de 24mm environ, avec une épaisseur de paroi d'environ 5mm, la taille des grains a été fixée à D64 correspond à une grosseur comprise entre 53 et 63 µm,. Le meulage a été effectué parallèlement à la surface circulaire de l'échantillon avec les paramètres de coupe suivants : vitesse de coupe 400 mm/min, avance de l'outil de coupe 18.8 m/s, vitesse de rotation de l'outil de coupe 15000 $min^{-1}$. L'outil tourne et avance le long de la surface de la pièce à une vitesse constante $v_c$ tout en oscillant longitudinalement dans sa direction axiale. Cette oscillation change sa direction en une amplitude A, sinusoïdale par rapport au temps, avec une fréquence ultrasonique f. Tous les tests expérimentaux ont été réalisés sur une machine de meulage assistée par ultrasons à commande numérique 5 axes (DMG 20 linear sauer Germany) représenté par la figure 4.3. Les propriétés des vibrations ultrasonores, avec une fréquence d'environ 20 kHz et une amplitude d'environ 2 µm ont été maintenues constantes. Si le système d'actionnement ultrasonique n'est pas activé, le meulage conventionnel (CG) aura lieu.

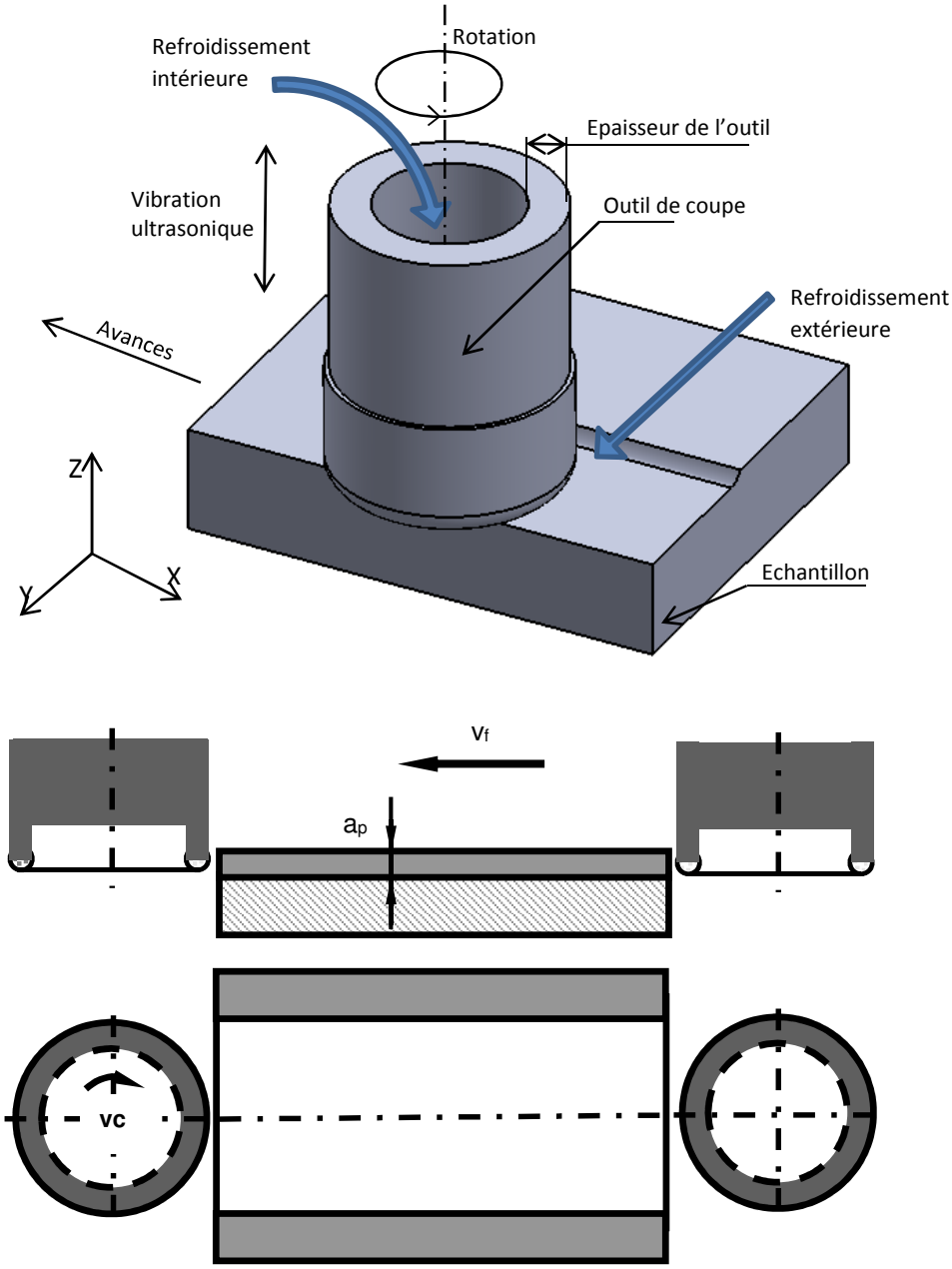



***Figure 4.2 :*** *Processus de meulage assisté par ultrasons*

***TABLE 4.1 :*** *Propriétés physiques de la vitrocéramique Zerodur® (Esmaeilzare A. et al. 2014)*

| Propriétés physiques | vitrocéramique Zerodur® |
|---|---|
| Densité (ρ) [g/cm$^3$] | 2.53 |
| Coefficient d'expansion thermique (α) [10$^{-6}$] | 0.02 |
| Module d'élasticité (E) [GPa] | 90.3 |
| Module de poisson (ν) | 0.24 |
| Ténacité ($K_{IC}$) [MPa × m$^{1/2}$] | 0.85 |

***Figure 4.3 :*** *Machine de meulage assisté par ultrasons (DMG 20 linear sauer Germany)*

La rugosité et la topographie de surface ont été mesurées en utilisant un profilomètre mécanique Form Talysurf Laser série 2 (Taylor Hobson Ltd.) (Voir figure 4.4), sur une longueur de base de 2,5 mm et avec application d'un filtre de 0.8mm, La rugosité de surface a subi en moyenne cinq mesures effectuées sur des endroits différents de l'échantillon.

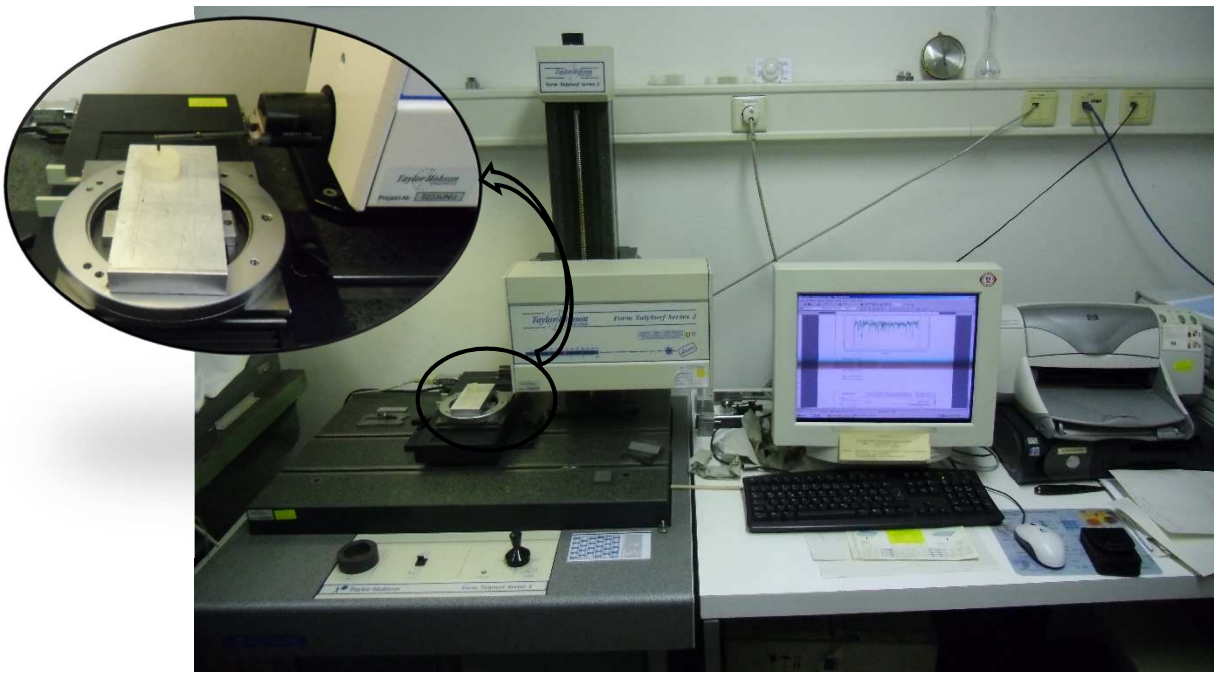


***Figure 4.4 :*** *Profilomètre mécanique Form Talysurf Laser série 2*

Le deuxième type est le verre sodocalcique dont les propriétés physiques et la composition chimique sont indiqués dans le tableau 4.2. 360 échantillons ont étés pré usinés en barres de flexion de 45 mm de longueur et 3 x 4 $mm^2$ de section, pour qu'ils soient en conformité avec la norme de flexion des matériaux fragiles ISO 14704 (STANDARD 2008) Le meulage de 60 échantillons a été effectué sur la machine (*DMG 20 linear sauer Germany)* illustré ci-dessus (voir figure 4.3). Trente échantillons ont été usinés avec le meulage assisté par ultrasons (UAG). Tandis que trente autres ont été meulés sans l'assistance ultrasonique. Le meulage a été réalisé en une seule passe parallèlement à la longueur de l'échantillon. La taille des grains a été fixée à D46 (grosseur des grains entre 38 et 45 µm) sur une meule boisseau diamantée. Les paramètres de meulage utilisés ont été pris comme suit : 20µm, pour la profondeur de coupe, 200 mm/min, vitesse de coupe, 8000 $min^{-1}$, vitesse de rotation de la meule. D'autre part, 120 échantillons ont été doucis en utilisant des grains abrasifs d'alumine ($Al_2O_3$) avec les fractions suivantes :F7, F28, F40, F80 correspondant à des grosseurs (7, 28, 40, 80 µm) respectivement.et chaque lot de trente échantillon a été doucis avec la même fraction, le principe de doucissage est illustré sur la figure.4.5.

***Tableau 4.2 :*** *Propriétés physiques du verre sodocalcique (Barton J. & Guillemet C. 2005)*

| **Propriétés physiques** | $\rho$ g/cm$^3$ | Tg $^0$C | $\alpha$ $10^{-6}$ °C$^{-1}$ | E GPa | $\nu$ | $H_v$ GPa |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | 2.52 | 480 | 8.5 | 75 | 0.22 | 5.73 |

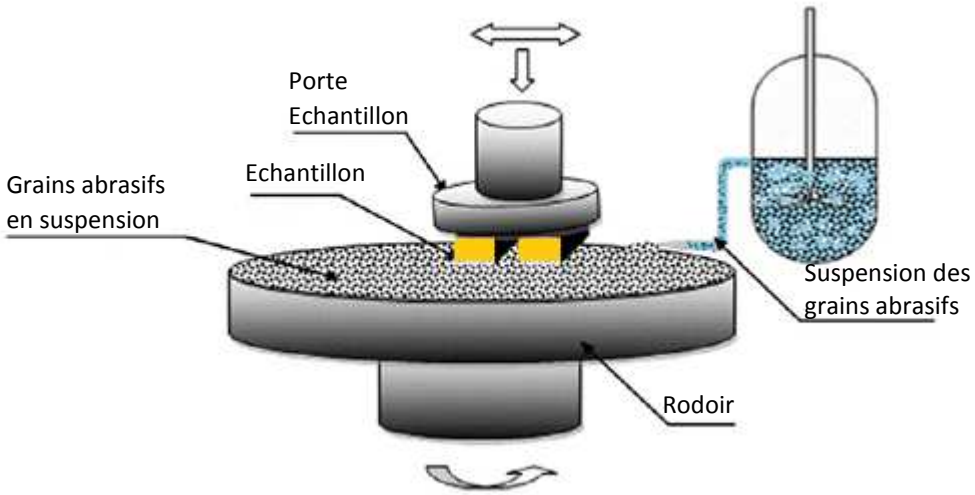



***Figure 4.5 :*** *Principe du processus de meulage. (Belkhir N. et al. 2011)*

### 4.3. Détermination de la résistance mécanique :

Afin de déterminer la résistance à la rupture des matériaux fragiles en l'occurrence le verre sodocalcique des essais de flexion à quatre points ont été effectués dans une salle a une température ambiante selon la norme ISO 14704. Ces essais ont été effectués sur une machine d'essai universelle de type TIRA test 2710 (voir figure 4.6). L'échantillon est supporté par deux rouleaux parallèles de diamètre 5 mm, la surface à tester est en contact avec les rouleaux extérieurs. Cette configuration est habituellement préférée à l'essai de flexion trois points, parce qu'une région avec un moment de flexion constant existe entre les rouleaux de chargement intérieurs. Généralement, la rupture se fait entre les appuis intérieurs ou le moment de flexion est maximum, alors que certaines ruptures se font à l'extérieure des appuis intérieures. Les données ont été prises seulement si la rupture s'est faite à l'intérieure des appuis.

***Figure 4.6 :*** *Machine de flexion (TIRA test 2710)*

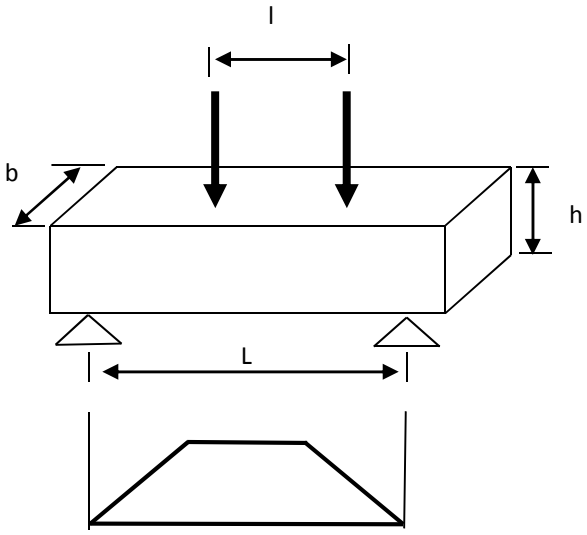



***Figure. 4.7 :*** *Essai de flexion quatre points*

A partir de la figure 4.7 qui illustre le principe de l'essai de flexion quatre points, la résistance à la flexion est calculée par l'équation suivante :

$$\sigma_f = \frac{3\,.\,F\,.(L-l)}{2\,.b\,.\,h^2} \qquad (4.1)$$

Avec F force appliquée, L, l distances entre appuis respectivement extérieurs et intérieurs, b largeur de l'éprouvette, h Epaisseur de l'éprouvette.

En ce qui concerne notre cas les distances entre les appuis utilisés L et l sont respectivement 40mm et 21mm.

### 4.4. Indentation :

La forme de la rupture des matériaux fragiles provoquée par des grains abrasifs est similaire à celle d'un indenteur de type Vickers. Des essais de micro indentation ont été effectués sur les surfaces polies du verre sodocalcique à une température ambiante en utilisant un microduromètre de type ***HMV-2000*** (voir figure 4.8), l'indenteur Vickers est poussé sur la surface de l'échantillon pour évoquer une déformation de surface. La gamme des charges normales appliquées se situait entre 100 mN et 1000 mN. D'un point de vue général, les fissures produites par indentation Vickers suivent les directions des diagonales. Bien que d'apparence similaire à la surface indentée, on peut distinguer deux régimes de fissuration : des fissures latérales, qui sont responsables de l'enlèvement de matière, et des fissures médianes, qui sont responsable de la dégradation de la résistance mécanique du matériau comme le montre la figure 4.9. Pour chaque empreinte, donc pour chaque charge d'indentation, on mesure la longueur des deux fissures générées des deux côtés de l'empreinte (2c), que l'on considère comme la profondeur de la couche endommagée.

***Figure 4.8 :*** *Microduromètre de type HMV-2000*

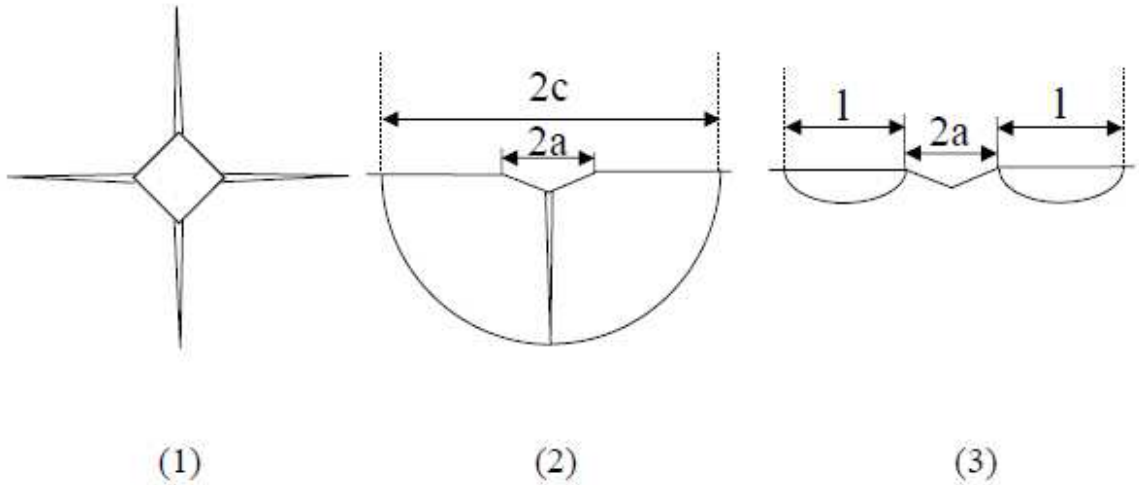



***Figure. 4.9 :*** *Schémas des fissures obtenues par indentation Vickers: (1) à la surface indentée, (2) dans la section transversale pour des fissures de type M et (3) pour des fissures de type L.*

### 4.5. Mesure de la couche fissurée SSD :

La mesure de la profondeur de SSD est conditionnée par la meilleure visualisation de la zone endommagée. En outre, et afin de permettre une meilleure et facile observation microscopique des fissures de la SSD, les échantillons ont été attaqués chimiquement en utilisant une solution d'acide fluorhydrique HF avec une concentration de 2% pendant une durée de 30 secondes, puis ils ont été nettoyés avec de l'eau distillée dans un bain à ultrasons pendant au moins 20 min et séchées à l'air libre à une température ambiante, par la suite les échantillons sont prêts pour la mesure de la SSD. L'observation optique et la mesure de la profondeur SSD ont été effectuées par un microscope optique interférentiel (Leica GmbH) illustré sur la figure 4.10.

Deux méthodes ont été adoptées dans ce travail pour l'évaluation de la profondeur de la couche endommagée SSD, la première est la technique de fossette (Dimple Technique) qui a été utilisé pour la vitrocéramique Zerodur®; tandis que la deuxième consiste à l'utilisation de la technique d'interface liée (The Bonded Interface Technique) pour le verre sodocalcique.

***Figure 4.10 :*** *Microscope optique interférentiels (Leica GmbH)*

### 4.5.1. Technique des fossettes (Dimple technique):

La technique des fossettes convient parfaitement à l'examen de la profondeur des endommagements de la subsurface et la distribution des fissures induites dans les différentes profondeurs de la surface meulée. Le principe de cette technique est simple : une roue de polissage en polyuréthane ayant un diamètre de 100 mm a été utilisée avec des abrasifs d'oxyde de cérium en suspension dans de l'eau distillée pour créer et polir une fossette dans chaque échantillon meulé de la vitrocéramique Zerodur® (voir figure 4.11).

La roue de polissage en polyuréthane a été fixée sur la broche d'une machine de fraisage de précision pour fournir un réglage fin, tandis que l'échantillon a été fixé perpendiculairement à l'outil. La fossette a été usinée avec une profondeur de 200 microns.

La profondeur de SSD est calculée par l'équation. (4.2) comme suit (Yang F. 2005):

$$SSD = \frac{D_1 - D_2}{2}\frac{D_1}{2R} - \frac{(D_1 - D_2)^2}{8R} \qquad (4.2)$$

Avec R est le rayon de la roue de polissage en polyuréthane, $D_1$ est le diamètre de la fossette, et $D_2$ est le diamètre de la zone libre usinée par le procédé de fossette.

La mesure de la profondeur effective de la fossette de l'échantillon a été réalisée avec le profilomètre mécanique.

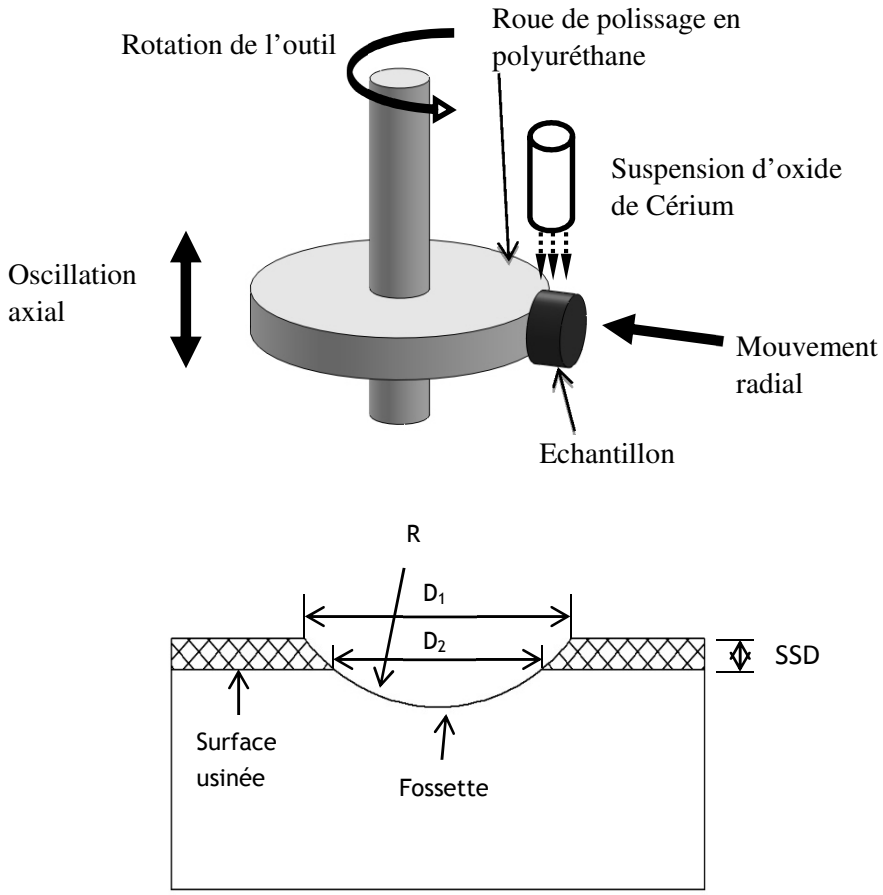



***Figure 4.11 :*** *Principe de la technique des fossettes.*

### 4.5.2. Technique de découpe d'interface collée (bonded interface sectioning technique) :

La technique de découpe d'interface collée (Hockin H. et al. 1994; Sanjay Agarwal & Venkateswara Rao P. 2008) a été utilisé pour une observation directe de la couche endommagée SSD du verre sodocalcique engendrée par le meulage et le doucissage. Dans cette méthode, on prend deux échantillons ayant des dimensions identiques et une surface de chaque échantillon doit être bien polie, ensuite on colle ces échantillons conjointement sur leurs surfaces polies, il est indispensable de serrer les échantillons étroitement ensemble lors du collage, pour faire une interface de liaison étroite. Une large interface entre les deux échantillons peut provoquer un endommagement artificiel pendant le meulage. La figure 4.12 montre la représentation schématique de la procédure utilisée dans la préparation des échantillons pour étudier l'endommagement de la subsurface qui se déroulera en trois étapes. Étape 1 : collage des deux échantillons sur leurs surfaces polies. Étape 2 : meulage/doucissage dans le plan ABCD. Étape

3 : mesure de la SSD à travers la surface polie. Les échantillons serons séparés en faisant fondre la colle et nettoyés avec de l'acétone dans un bain à ultrasons. L'observation de la couche endommagée se fait à travers la surface polie à l'aide d'un microscope optique interférentiel (Leica).

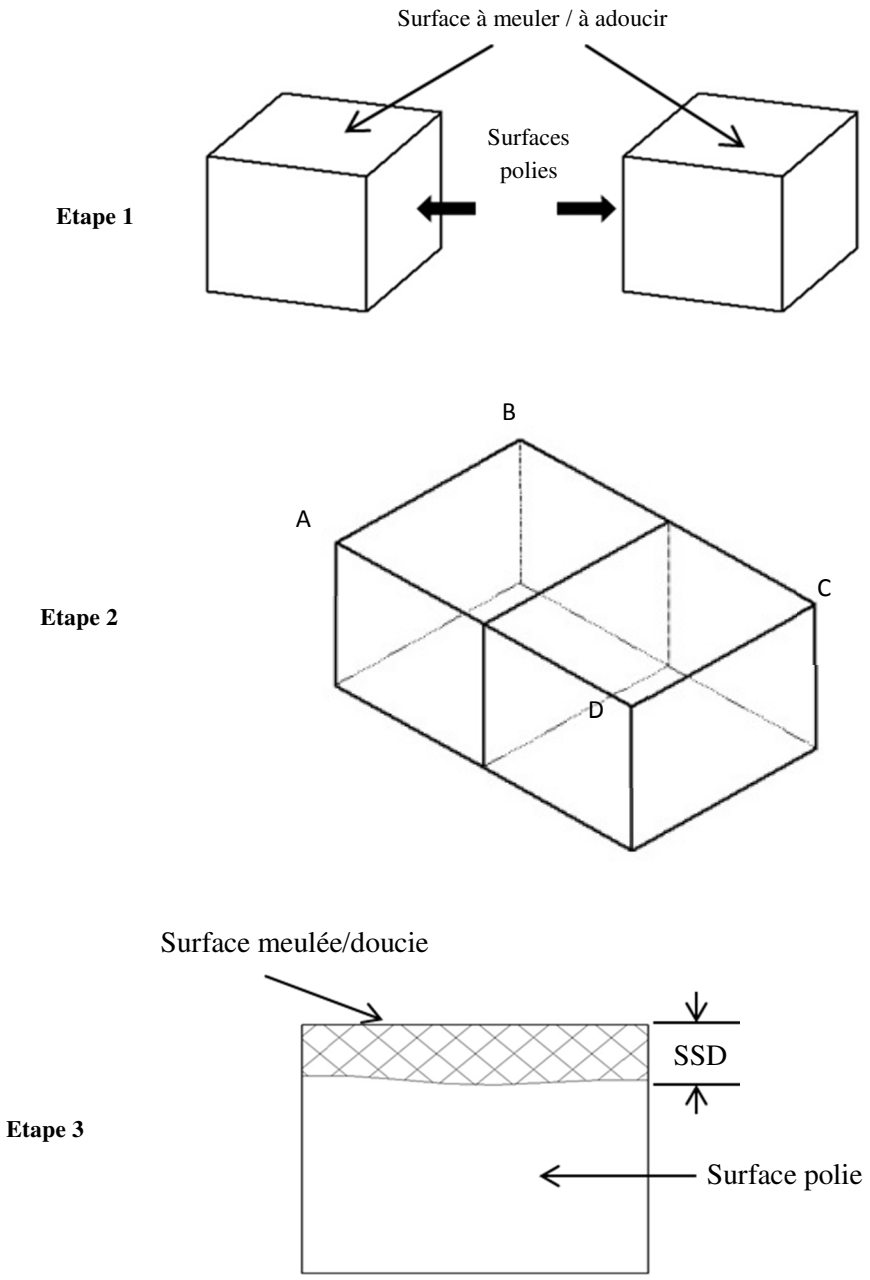



***Figure 4.12 :*** *Illustration schématique de procédure de la technique de l'interface de découpe collée.*

## 4.6. Résultats et discussions :

### 4.6.1. Vitrocéramique Zerodur®

#### 4.6.1.1. Topographie de la surface :

La figure 4.13 représente la topographie de surface de la vitrocéramique Zerodur® meulée avec et sans assistance ultrasonique. Pour déterminer les effets ultrasoniques sur les mécanismes de formation de surface, le meulage conventionnel (CG) et le meulage assisté par ultrason (UAG) ont été effectués. Les résultats indiquent que la qualité de surface du meulage assisté par ultrasons est inférieure à celle du meulage conventionnel. En effet, moins de cratères sont observés lors de l'utilisation du procédé CG avec une plage de rugosité comprise entre 0,5 et 3 µm, alors qu'elle est entre 0,5 et 5,5 µm avec l'utilisation d'UAG.

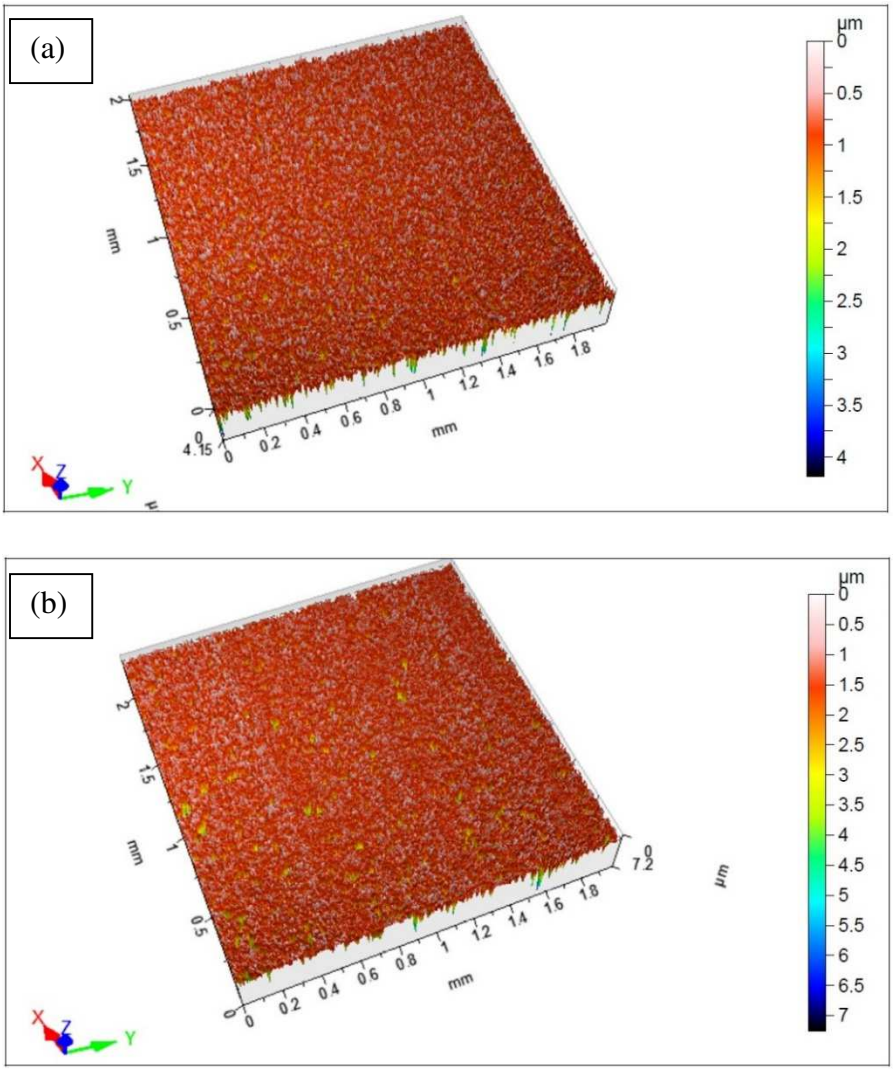



***Figure 4.13 :*** *Topographie de surface de la vitrocéramique Zerodur® obtenue par : (a) CG et (b) UAG*

Dans le meulage conventionnel, la rupture et les éclats sont induits généralement par les fissures latérales qui dominent le processus de meulage et se propagent en dessous du plan de la surface

meulée, ces fissures latérales sont responsables de l'enlèvement de la matière, c'est pourquoi des piqures avec différentes largeurs et profondeurs sont générées.

Le profil de rugosité de surface des deux modes de meulage CG et UAG est illustré dans la figure 4.15 et à partir de ces profils on peut extraire les paramètres de la rugosité (Ra, Rt et Rz), afin de mettre en évidence la discussion de la section précédente ou il a été conclu que la qualité de surface obtenue par CG est meilleure que celle obtenue par UAG, la figure 4.15 représente les paramètres de la rugosité.

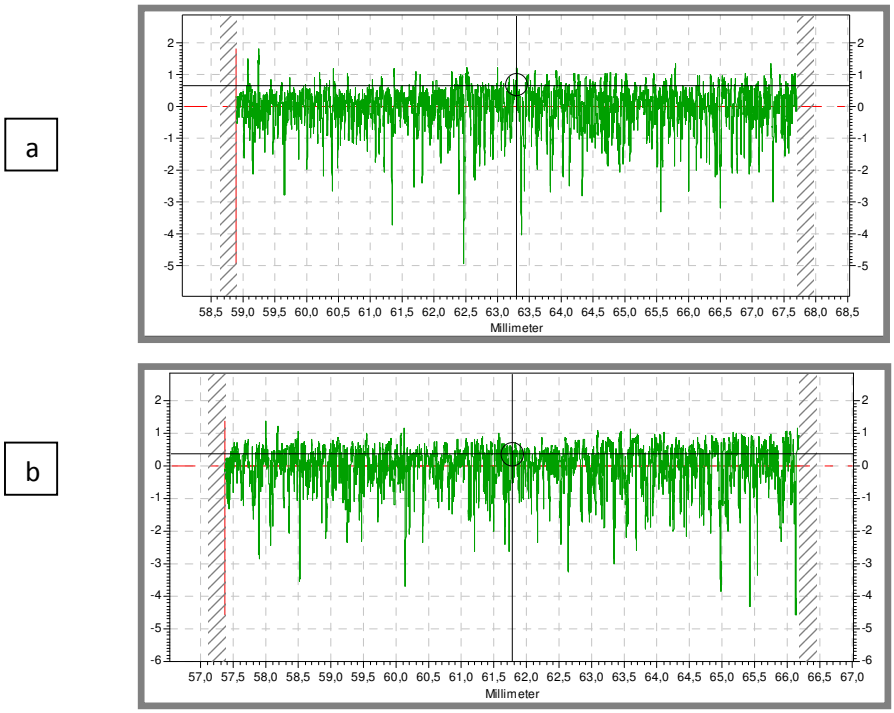



***Figure 4.14 :*** *Profil de rugosité de surface obtenu par : (a) CG et (b) UAG.*

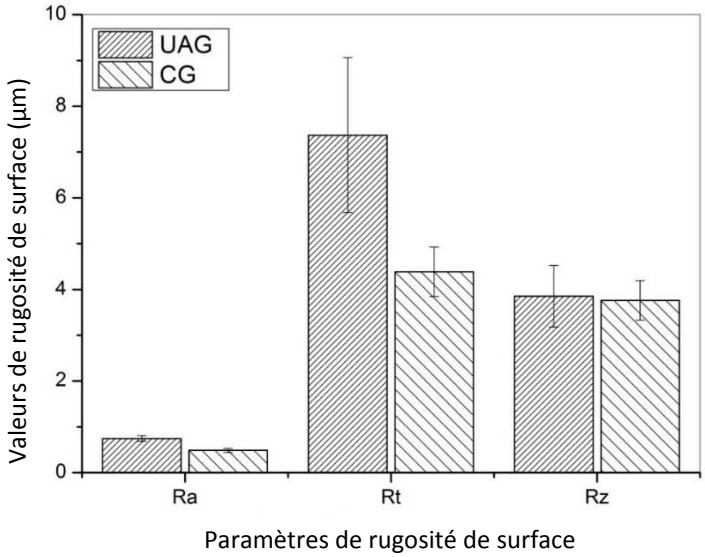



***Figure 4.15 :*** *Paramètres de rugosité de la vitrocéramique Zerodur® UAG et CG.*

La figure 4.16 montre une comparaison de la topographie d'ondulation et de rugosité obtenue par les procédés UAG et CG, on constate que dans le CG la surface a des caractéristiques géométriques en grande partie stochastique, sans ondulation dominante, tandis que dans l'UAG présente une ondulation qui se traduit par une augmentation de la rugosité. La figure 4.17 montre aussi une comparaison entre les deux procédés CG et UAG avec des images obtenues par le MEB, on peut déduire que les surfaces dans le meulage conventionnel présentent un aspect de rupture fragile intensive, ce qui implique que la rupture fragile est prédominée sur l'enlèvement de matière dans le processus CG. Toutefois, les conditions de contact dans le meulage assisté par ultrasons sont plus complexes. L'oscillation perpendiculaire induit des variations périodiques de la profondeur de coupe, ce qui conduit à des zones d'enlèvement de matière avec un mode fragile dominant et des zones à faibles profondeurs de coupe au niveau du sommet de la trajectoire sinusoïdale de l'outil où le mode d'enlèvement de matière ductile semble être possible. (Uhlmann E. & Spur G. 1998), ont montrés que la superposition des vibrations ultrasonique produit des angles d'engagement plus grands, une longueur de copeaux plus courte et des profondeurs plus élevées d'indentation, exposant ainsi à la fois les grains de diamant et le matériau à des sollicitations mécaniques élevées. Par conséquent, la surface usinée est fracturée fortement.

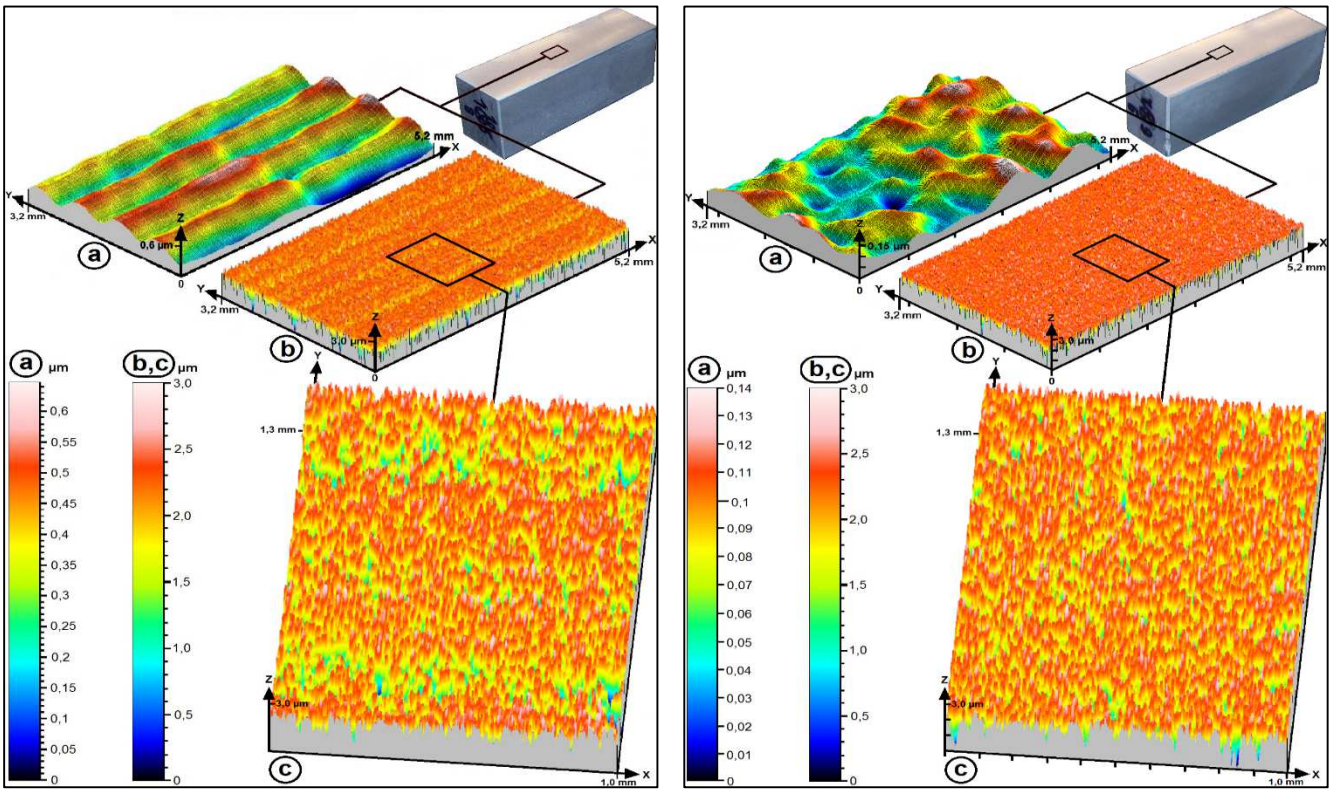



***Figure 4.16 :*** *Topographie de rugosité et d'ondulation / comparaison entre UAG et CG.*

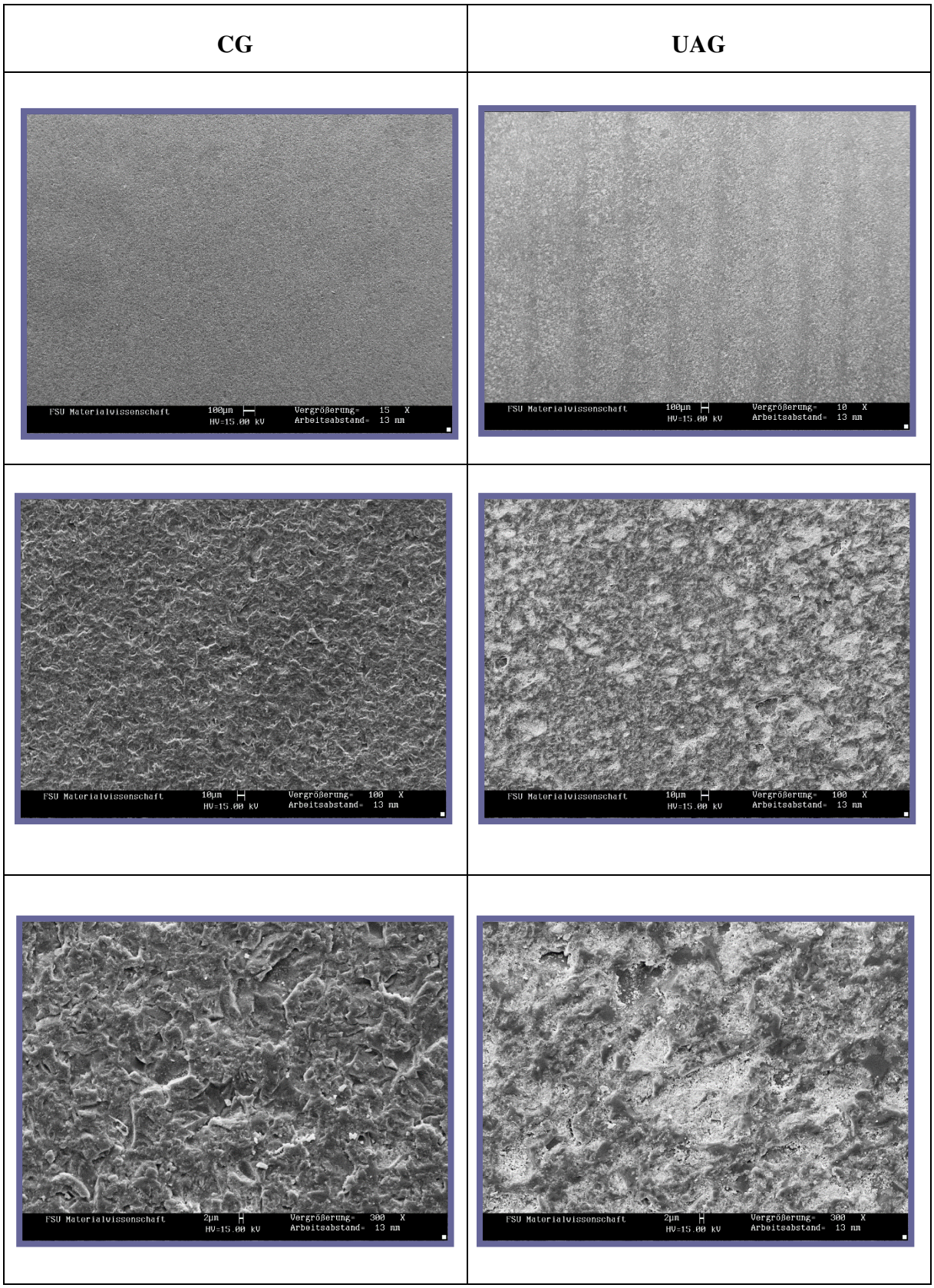



***Figure 4.17 :*** *Comparaison entre CG et UAG avec des images MEB*

#### 4.6.1.2. Influence de la taille des grains abrasifs :

Le meulage avec et sans l'assistance ultrasonique a été effectué sur les échantillons du verre sodocalcique. Une meule boisseau diamantée a été utilisée avec deux tailles différentes des grains abrasifs, D46 et D91, qui correspondent à une grosseur de grains de (38-45µm) et (75-90µm) respectivement, la méthode et les paramètres de coupe ont été expliqués auparavant dans la section procédures expérimentales. L'état de surface résultant après le meulage est représenté sur la figure 4.18 qui montre la variation de la rugosité (P-V) en fonction de la grosseur des grains de diamant de l'outil ainsi que l'effet ultrasonique de la machine, d'après le graphe il est clair qu'en utilisant l'outil D91 la rugosité (P-V) est presque la même avec ou sans l'assistance ultrasonique par contre elle est plus élevée en meulage conventionnel qu'en meulage assisté par ultrason lorsqu'on utilise l'outil D46. De ce fait, on peut déduire que l'effet ultrasonique ne joue aucun rôle si la taille des grains est grosse.

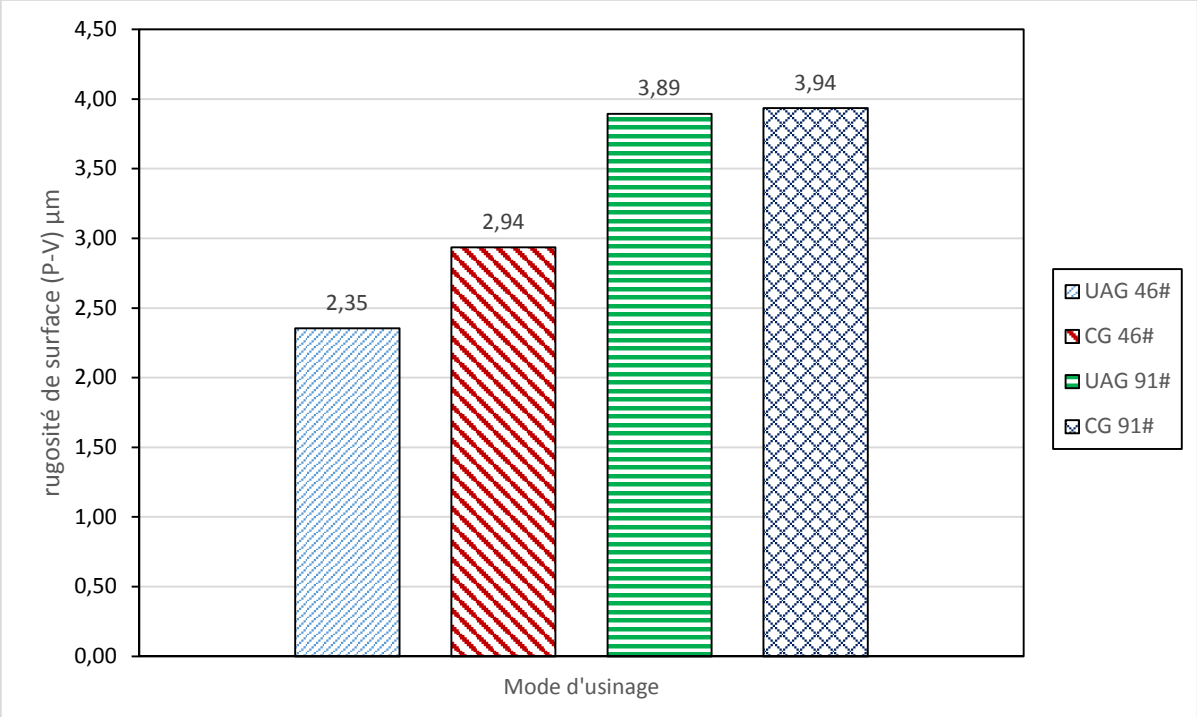



***Figure 4.18 :*** *Variation de la rugosité de surface (P-V) en fonction de de la taille des grains de la meule et le procédé de meulage.*

#### 4.6.1.3. Evaluation de le couche endommagée SSD :

Dans la plupart des cas, le processus de meulage est la première étape de l'usinage d'un matériau fragile, dans laquelle la SSD est produite. Par conséquent, la profondeur de SSD générée dans cette étape est très importante car elle influe sur le temps des opérations qui suivent, donc sur le coût des composants optiques et sur leurs qualités. En outre, pendant le doucissage et le

polissage, la surface doit être améliorée en supprimant la couche de SSD. La figure 4.19 illustre la morphologie de SSD de la vitrocéramique Zerodur® faite par la technique des fossettes. Avec l'augmentation de la profondeur, la densité des morphologies de cratères diminue progressivement jusqu'à une certaine profondeur dans laquelle toutes les fissures sont atténuées. Il convient de noter que les valeurs ne sont pas obtenues par des mesures directes, mais calculées par l'équation. (4.2). Cependant, trois zones devenus apparentes sont observés, une zone polie produite par la technique des fossettes, une zone meulée créée lors du procédé de meulage qui comprend la structure typique du meulage des matériaux fragiles et de nombreuses fissures, la dernière est une zone de transition entre la surface polie et la surface meulée.

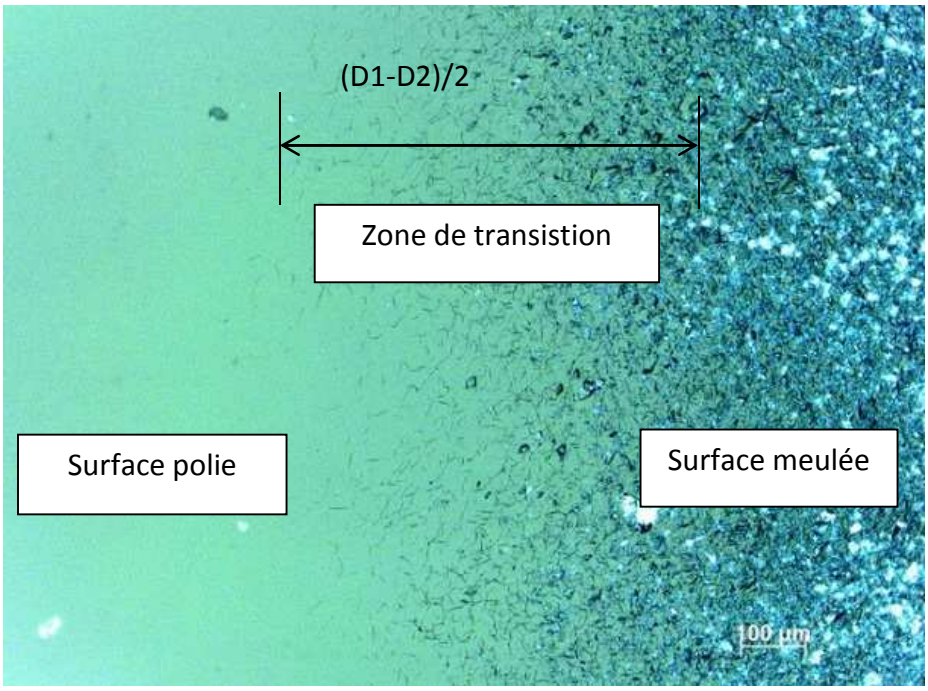



***Figure 4.19 :*** *Morphologie de la SSD obtenue par la technique des fossettes.*

Le matériau fragile présente un comportement ductile à des dimensions micrométriques, donc, les fissures et les rayures produites sont plus fines. Lv et al (Dongxi Lv et al. 2013b), ont démontrés que toutes les surfaces produites par UAG comprenaientt deux zones différentes : une zone fracturée, similaire à la morphologie de la surface façonnée par CG, et une zone pulvérisable. Ils ont conclus que, par comparaison des surfaces d'un échantillon en verre BK7 générés avec et sans l'assistance ultrasonique, qu'il est évident que la vibration ultrasonique affecte légèrement le processus d'enlèvement de matière dans la production des zones fracturées dans l'UAG.

#### 4.6.1.4. Influence de la profondeur de coupe :

Comme représenté sur la figure 4.20 et la figure 4.21 la rugosité de la surface (P-V) et la profondeur de la subsurface SSD dans les deux procédés de meulage UAG et CG augmentent considérablement avec l'augmentation de la profondeur de coupe qui augmente la force de coupe à son tour. Ceci a été prouvé par Lv et al. (Dongxi Lv et al. 2013a) lorsqu'ils ont mesurés les forces de coupe dans UAG et CG par rapport à la profondeur de coupe. Cependant, si le contact d'adhérence entre la meule et la surface du verre est plus grand il en résulte une charge plus importante sur les grains abrasifs et une SSD plus significative.

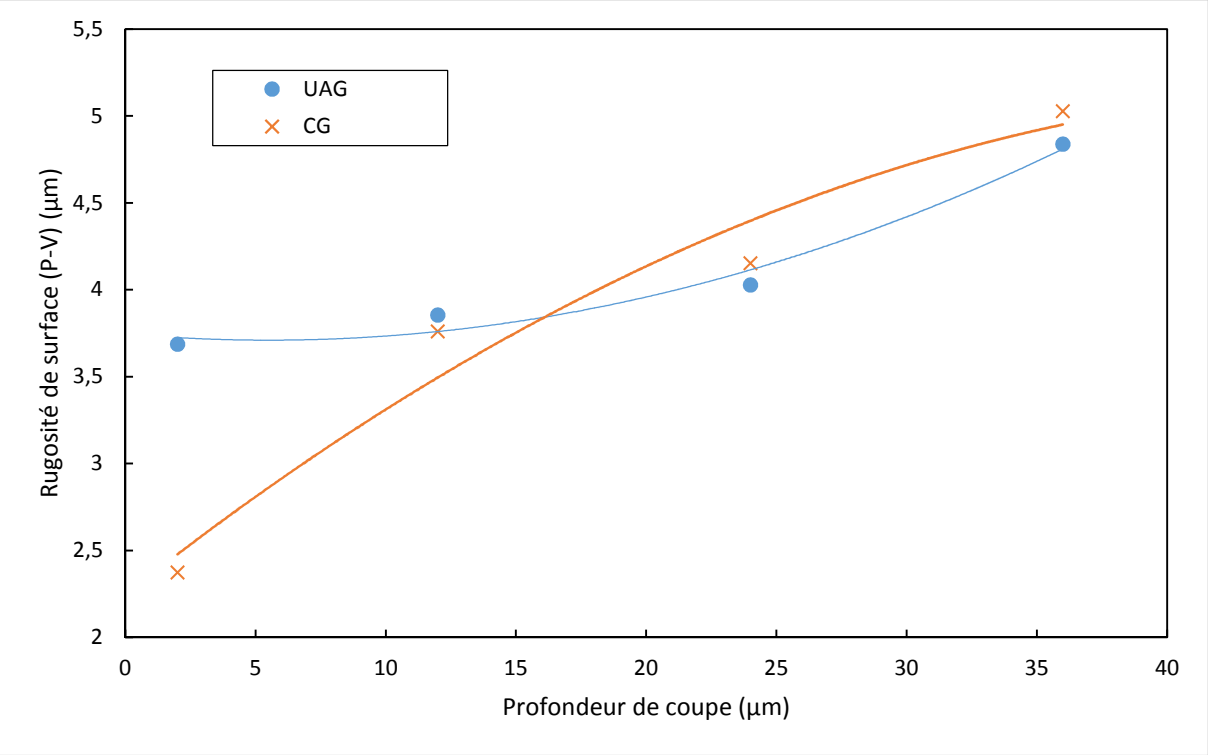



***Figure 4.20 :*** *Relation entre la rugosité de surface et la profondeur de coupe en CG et UAG.*

La figure 4.20 montre que, si la profondeur de coupe ne dépasse pas 15 µm, la rugosité de surface obtenue par UAG est supérieure à celle obtenue par CG. Cela peut être prouvé par la figure 4.22 qui illustre la topographie de surface de chaque point donc de chaque valeur de rugosité des deux courbes de la figure 4.20. Cette variation des valeurs de rugosité peut être expliqué par le fait que le résultat de l'oscillation ultrasonore longitudinale causant des endommagements à la surface de la pièce en raison de son action de micro écrasement contre la pièce conduisant à la formation d'une couche de pulvérisation, située à proximité de la surface supérieure de l'échantillon sans expansion à l'intérieur du matériau. Lv et al. (Dongxi Lv et al. 2013b) ont démontrés que les effets d'inertie du matériau provoqués par les charges dynamiques

des grains abrasifs augmenteraient la vitesse de déformation et diminueraient la ténacité dynamique, ce qui provoque la fragmentation du matériau et affectant la surface. En outre, ce phénomène peut être dû à la présence de particules fragmentées de l'outil ou de la pièce qui sont sous l'effet de l'oscillation longitudinale de l'outil, seront projetés sur la surface de l'échantillon et induiront des cratères. La figure 4.21 montre que, pour les profondeurs de coupe 2, 12, 24 et 36 um, les profondeurs de SSD générées dans le meulage assistée par ultrasons sont respectivement de 53, 24, 21 et 22% de moins que ceux générés par le procédé de meulage conventionnel. Yan et al. (Yan J. et al. 2009) ont prouvés que le matériau autour de l'outil de coupe subit une transition de phase non-métallique a la phase métallique, ce qui rend le matériau ductile et facilite l'enlèvement de matière avec ce mode, donc immédiatement sous la pointe de l'outil il va y avoir une pression hydrostatique uniforme sur le matériau, en raison de la contrainte imposée par ce dernier, une zone plastique se manifeste. Cependant, la propagation de fissures ne peut avoir lieu sous cette condition, car aucune contrainte de traction n'est présente dans cette zone ; ce qui explique pourquoi la profondeur de SSD dans l'UAG est inférieure à celle dans le processus CG.

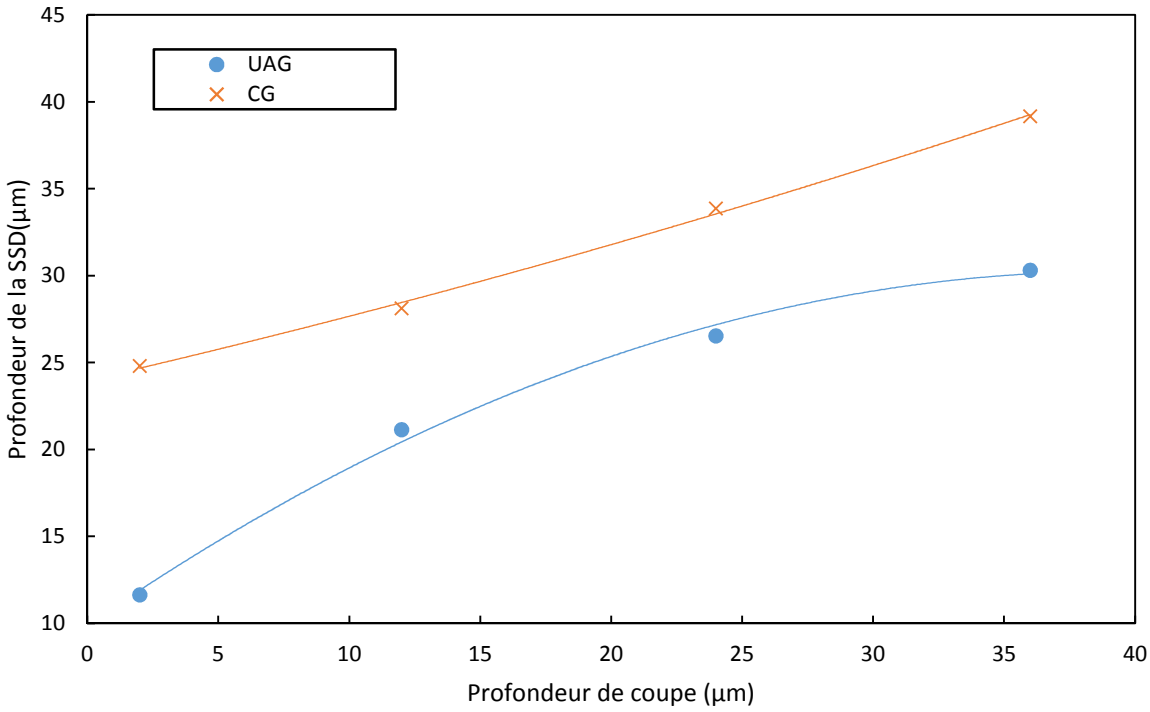



***Figure 4.21 :*** *Relation entre la SSD et la profondeur de coupe en CG et UAG.*

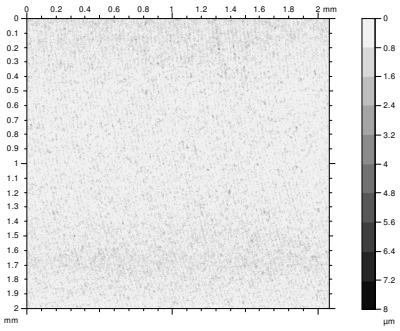
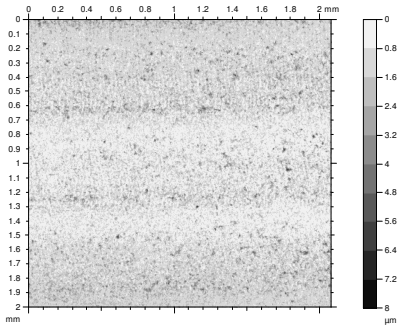
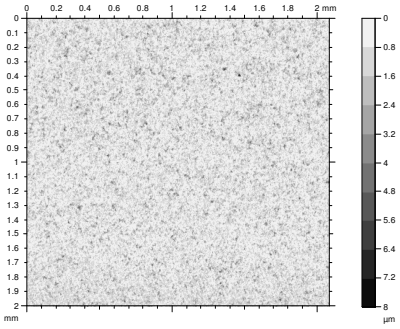
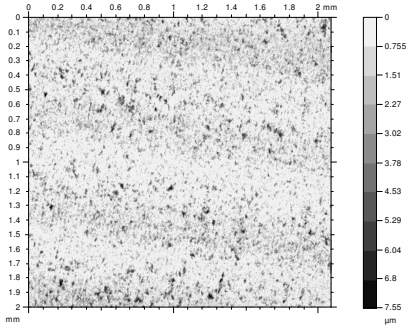
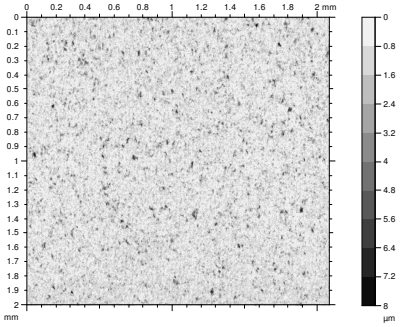
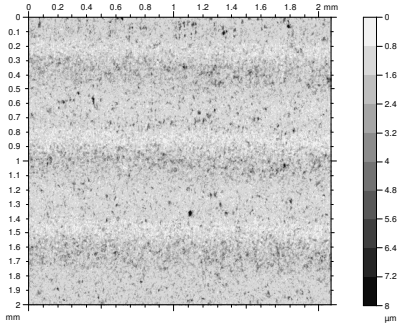
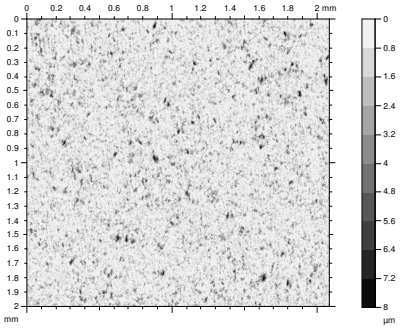
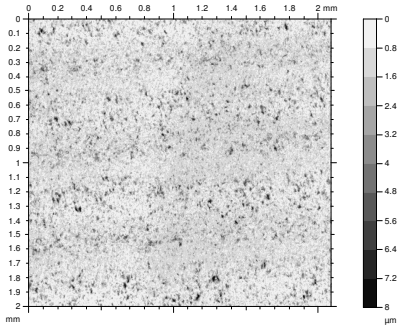
| | CG | UAG |
|---|---|---|
| $a_p = 2$ |  |  |
| $a_p = 12$ |  |  |
| $a_p = 24$ |  |  |
| $a_p = 36$ |  |  |

***Figure 4.22 :*** *Influence de la profondeur de coupe sur la topographie de surface dans CG et UAG*

#### 4.6.1.5. Corrélation entre la profondeur de SSD et la rugosité de surface (P-V) :

La figure 4.23 montre la corrélation entre la rugosité de surface (P-V) et la profondeur de la couche endommagée SSD dans les deux processus de meulage avec et sans l'assistance ultrasonique à travers une courbe de tendance des valeurs mesurées, comme on peut le voir, la profondeur de SSD augmente progressivement avec l'augmentation de la rugosité, il existe une corrélation monotone croissante non linéaire entre la profondeur de SSD et la rugosité. Hed (Hed P.P. & Edwards D.F. 1987) et Esmaeilzare (Esmaeilzare A. et al. 2014), ont mesurés la profondeur de la SSD et la rugosité de surface de la vitrociramique Zerodur® avec des grains abrasifs liés (abrasif en diamant, taille comprise entre 53 microns et 250 microns) et meule boisseau diamantée avec une taille des abrasifs D76 correspond à une grosseur de (63 – 75 µm), les figures 4.24 trace la profondeur de SSD et la rugosité de surface (P-V) à partir des résultats obtenus par Hed et Esmaeilzare, respectivement. Il existe également une corrélation monotone croissante non linéaire entre la SSD et la rugosité de surface (P-V), comparé à notre travail représenté sur la figure 4.23.

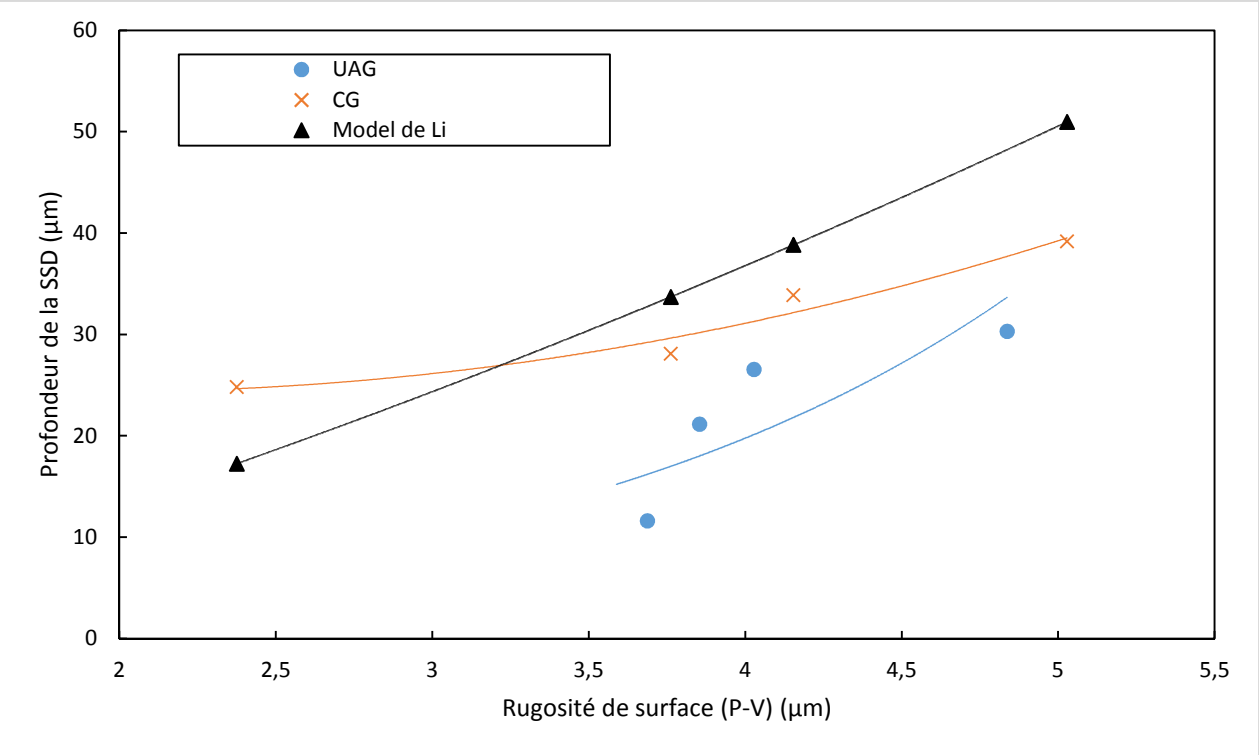



***Figure 4.23 :*** *Corrélation entre SSD et SR dans UAG et CG*

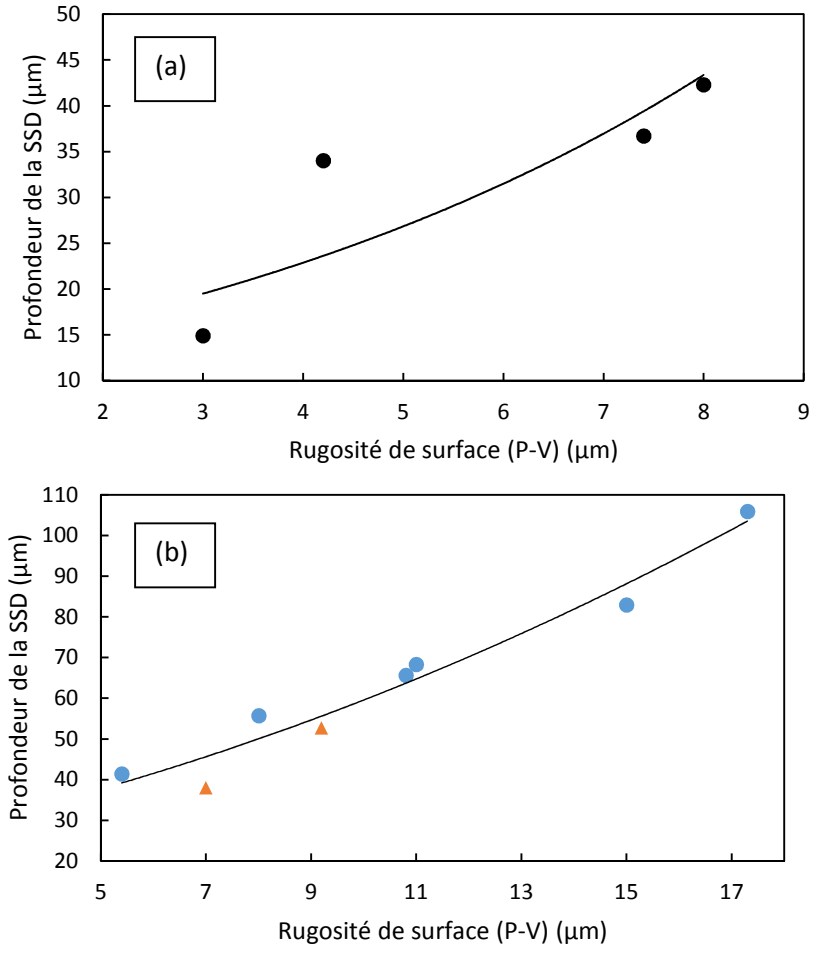



***Figure 4.24 :*** *Corrélation entre SSD et SR de la vitrociramique Zerodur® obtenue par (a) Hed et al. (b) Esmaeilzare et al.*

#### 4.6.1.6. Comparaison des résultats expérimentaux et le modèle de Li :

Les résultats expérimentaux obtenus dans cette étude sont comparés à celle du modèle théorique de Li (Li H.N. et al. 2016) représenté dans l'équation (4.3). Ce modèle peut évaluer les valeurs de SSD avec plus de précision si la valeur de Rz est inférieure à 4,5 um. Les valeurs de SSD obtenues par ce modèle sont en concordance avec les résultats expérimentaux obtenus par le meulage conventionnel. De ce fait, nous avons conclu que le modèle de Li ne peut pas prédire la profondeur de la SSD dans le mode UAG car la SSD mesurée dans les résultats expérimentaux est inférieure à celle de ce modèle théorique (voir figure 4.23), la raison pourrait être que la formation de la SSD en mode UAG est beaucoup plus complexe que le meulage conventionnel (mode fragile), qui est similaire à une charge normal ou oblique d'un indenteur (Lambropoulos J.C. et al. 1999)

$$SSD = F(R_z) = \frac{\lambda}{(K_0 - 1)^{4/3}}.R_z^{4/3} - \frac{1}{K_0 - 1}.R_z \qquad (4.3)$$

Avec

$$\lambda = 0{,}206.\left(\frac{E^{1/2}.H_s^{1/2}}{K_c.\beta}\right)^{2/3}.\left(\cot\frac{\psi}{2}\right)^{4/9}.\left(\tan\frac{\psi}{2}\right)^{4/3} \qquad (4.4)$$

Avec E le module de young, $\psi$ l'angle d'acuité de l'indenteur, Hs la dureté de scratch, Kc la ténacité, et le paramètre de la reprise élastique $\beta$.

Et

$$K_0 = \left[\frac{3(1-2\upsilon)}{5-4\upsilon} + \frac{2\sqrt{3}}{\pi(5-4\upsilon)}.\frac{E}{\sigma_y}.\cot(\frac{\psi}{2})\right]^{1/2}.\tan(\frac{\psi}{2}) \qquad (4.5)$$

Avec $\upsilon$ le coefficient de Poisson et $\sigma_y$ la limite d'élasticité.

### 4.6.2. Verre sodocalcique :

#### 4.6.2.1. Détermination de la rugosité :

Le doucissage joue un rôle important dans la fabrication des composants optique, il est principalement appliqué pour réaliser des formes précises et pour un taux d'enlèvement élevé de la matière. Les échantillons de verre sodocalcique ont été doucis sur un rodoir en acier dur avec des grains abrasifs d'alumine ($AL_2O_3$) F7, F28, F40, F80 Le profil de l'état de surface obtenu par ces fractions est représenté sur la figure 4.25. Les valeurs de la rugosité (P-V) ont été extraites à partir des profils de l'état de surface et elles sont indiquées dans la figure 4.26 en fonction de la grosseur des grains abrasifs. Lors du processus de doucissage Le grain abrasif est forcé de rouler entre la surface de la pièce et la surface de l'outil ce qui mène les bords tranchants des abrasifs à pénétrer dans la surface de la pièce et conduit à l'arrachement de la matière en conséquence la formation et la propagation des fissures dans la surface et donc à l'endommagement de l'état de surface de la pièce. On constate sur cette figure que la rugosité est proportionnelle à la taille des grains abrasifs, ceci est expliqué par le fait que les gros grains abrasifs pénètrent profondément dans la surface et provoquent des endommagements plus importants que les petits grains, donc les dimensions des grains abrasifs ont une grande influence sur l'endommagement de la surface optique.

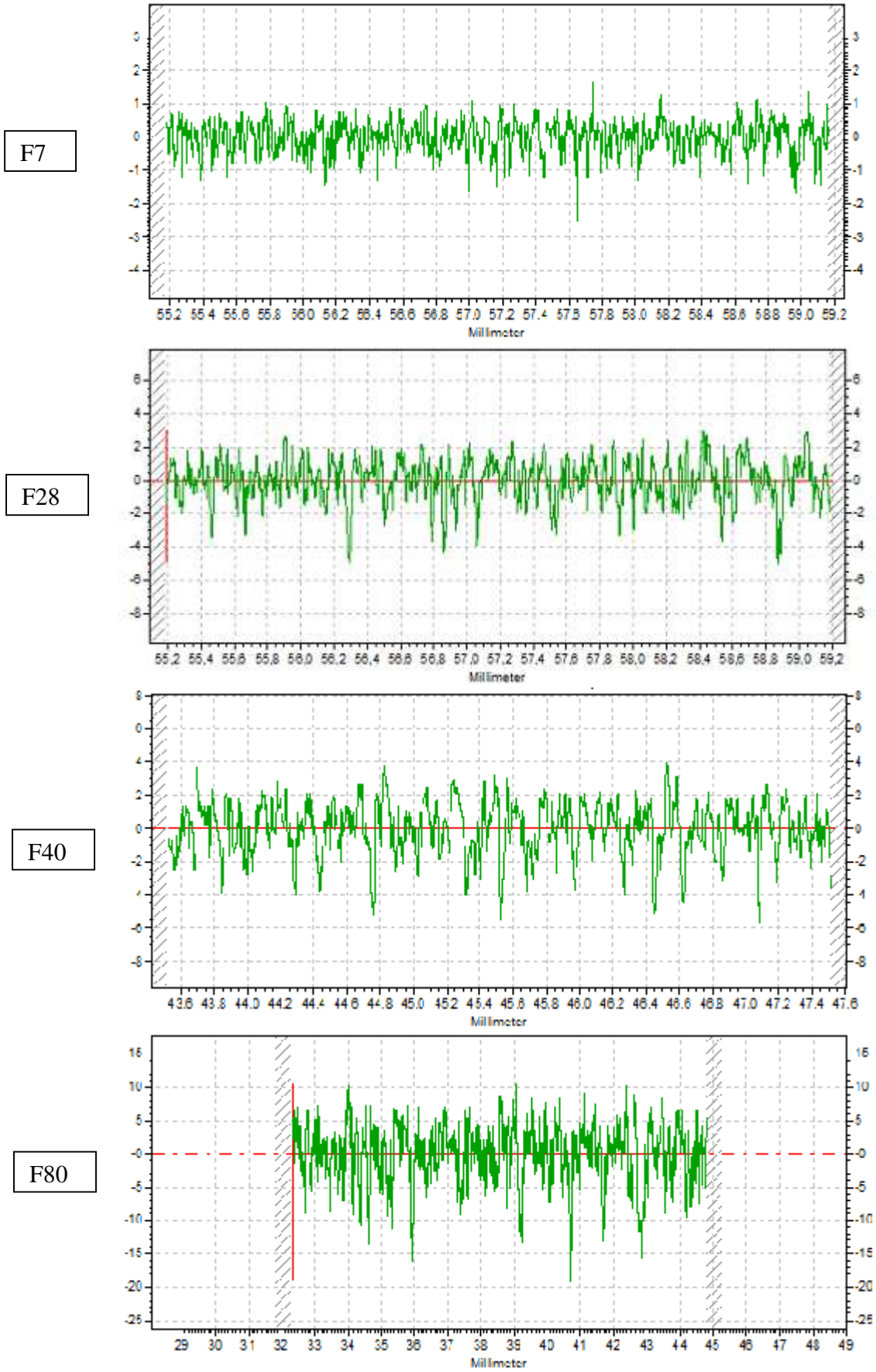



***Figure 4.25 :*** *Profil d'état de surface du verre sodocalcique douci par différente taille des grains abrasifs*

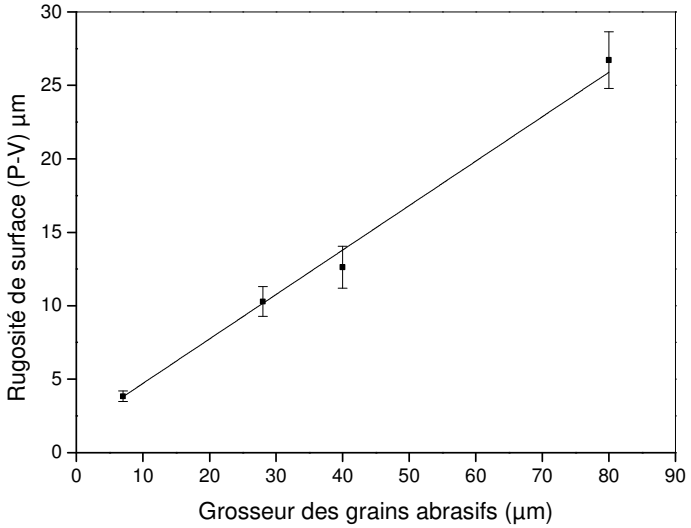



***Figure 4.26 :*** *Variation de la rugosité Rz (p-v) en fonction de la grosseur des grains abrasifs*

#### 4.6.2.2. Evaluation de la couche endommagée SSD :

Afin de voir la distribution de la couche endommagée et de mesurer la profondeur de ses fissures directement, la technique de découpe d'interface collée ***(bonded interface sectioning technique)*** est un meilleur choix. Pour ce faire, chaque cinq échantillons fixés sur le même support ont été meulés avec et sans l'assistance ultrasonique et d'un autre coté ils ont été doucis avec la taille des grains abrasifs F7, F28, F40, F80, respectivement. Ensuite, ils ont été attaqués chimiquement en utilisant l'acide fluoridrique HF avec une concentration de 2% pendant 30 secondes pour ouvrir les fissures afin de faciliter l'observation. La mesure de la couche endommagée a été effectuée à l'aide d'un microscope polariseur de type Leica par l'observation à travers la surface polie ; les résultats obtenus sont montrés dans les figures 4.27 et 4.28.

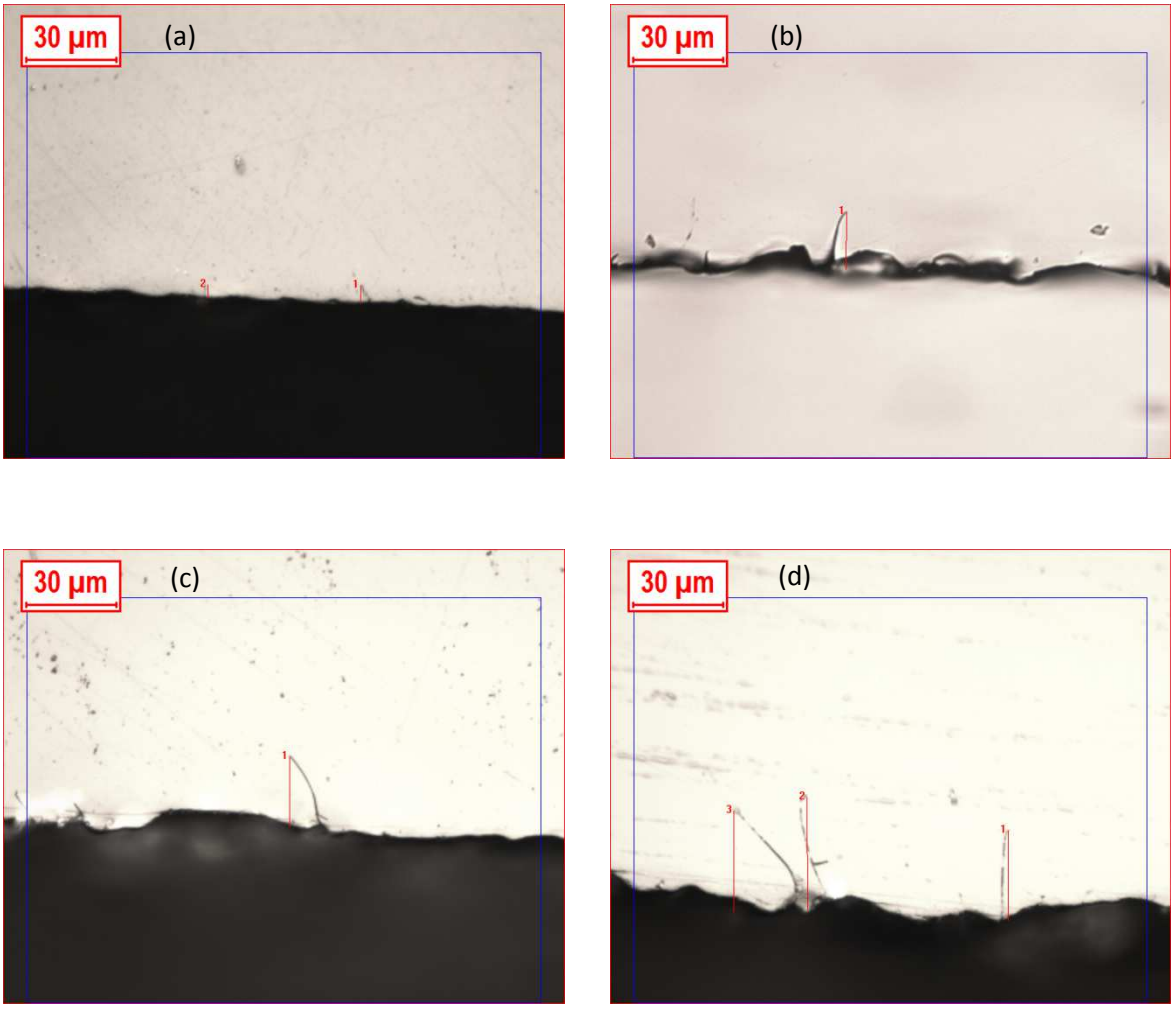



***Figure. 4.27 :*** *Vue de côté des fissures engendrées par différentes grosseurs des grains abrasifs (a) F7, (b) F28, (c) F40, (d) F80.*

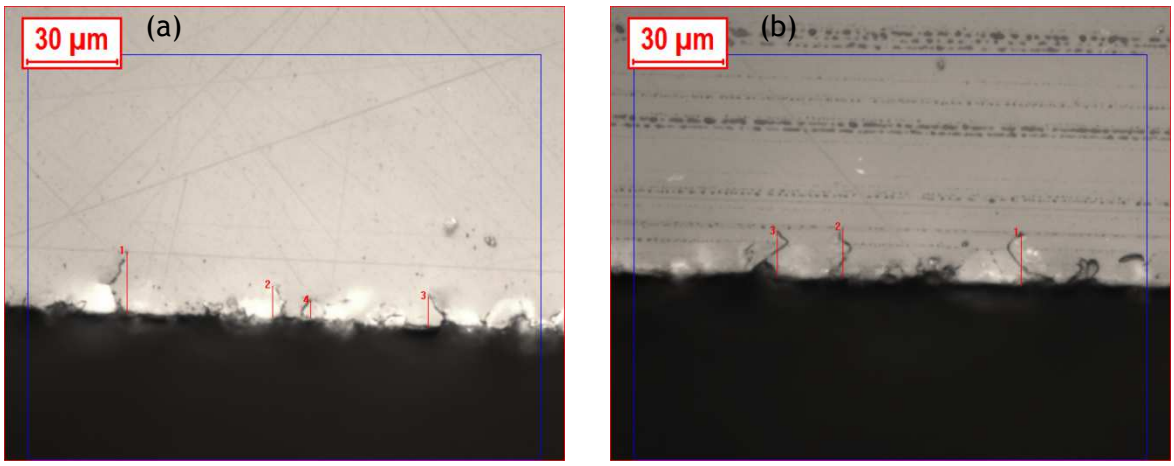



***Figure. 4.28 :*** *Vue de côté des fissures engendrées par (a) UAG, (b) CG*

#### 4.6.2.3. Relation entre la SSD et la taille des grains abrasifs :

Sur la figure 4.29 qui représente la relation entre la profondeur de la SSD et la taille des grains abrasifs du verre sodocalcique créée dans le processus de doucissage avec quatre différentes tailles de grains abrasifs d'Alumine ($Al_2O_3$). On peut constater que la profondeur de la SSD augmente proportionnellement avec l'augmentation de la taille des grains abrasifs, il existe une corrélation monotone croissante linéaire entre la profondeur de SSD et la taille des grains abrasifs. Donc les dimensions des grains abrasifs ont une grande influence sur l'endommagement de la subsurface du verre optique. Cependant, l'apparition et la propagation des fissures dans la surface et la subsurface est le mécanisme dominant contrôlant la qualité de surface du verre douci, ces résultats sont en concordance avec notre travail précédent, ou il a été prouvé que la rugosité augmente avec l'augmentation de la taille des grains abrasifs (Belkhir N. et al. 2011).

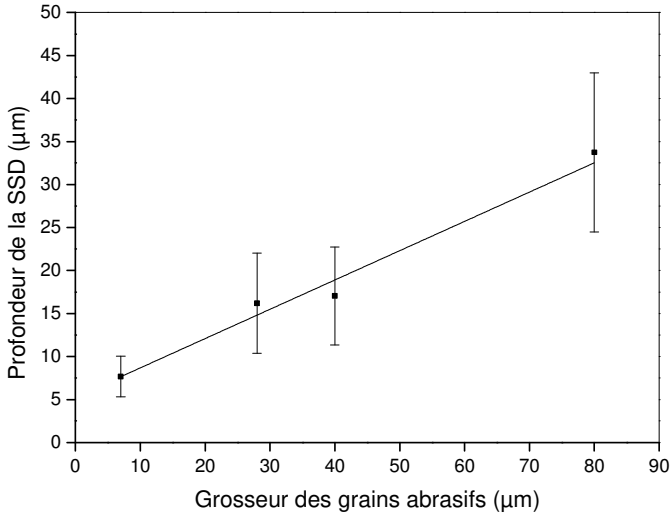



***Figure. 4.29 :*** *Variation de la SSD en fonction de la taille des grains abrasifs*

#### 4.6.2.4. Corrélation ente la SSD et la rugosité de surface SR :

Dans le but d'une mesure rapide, précise et non destructive de l'endommagement de la subsurface produite dans les processus de meulage et de doucissage, la relation entre la profondeur de la couche endommagée SSD et la rugosité de surface (P-V) a été établie, cette relation est représentée dans la figure 4.30. Il est remarquable que la profondeur de SSD augmente graduellement avec l'augmentation de la rugosité (P-V) et qu'il y ait une corrélation non linéaire croissante monotone entre la profondeur de SSD et la rugosité (P-V). La base de la

corrélation peut être le résultat des caractéristiques des fissures qui conduisent à la SSD et la morphologie de surface, respectivement (Miller P.E. et al. 2005). Il y a beaucoup de résultats expérimentaux et plusieurs modèles théoriques en vue d'établir une relation entre SSD et la rugosité (P-V) de matériaux optiques. Ces derniers indiquent une corrélation linéaire entre la profondeur de la SSD et la SR avec une constante de proportionnalité. Les résultats obtenus dans notre travail sont en agrément avec les résultats expérimentaux d'autres chercheurs (Hed P.P. & Edwards D.F. 1987; Lambropoulos J.C. et al. 1999; Li D. et al. 2008; Randi J.A. et al. 2005).

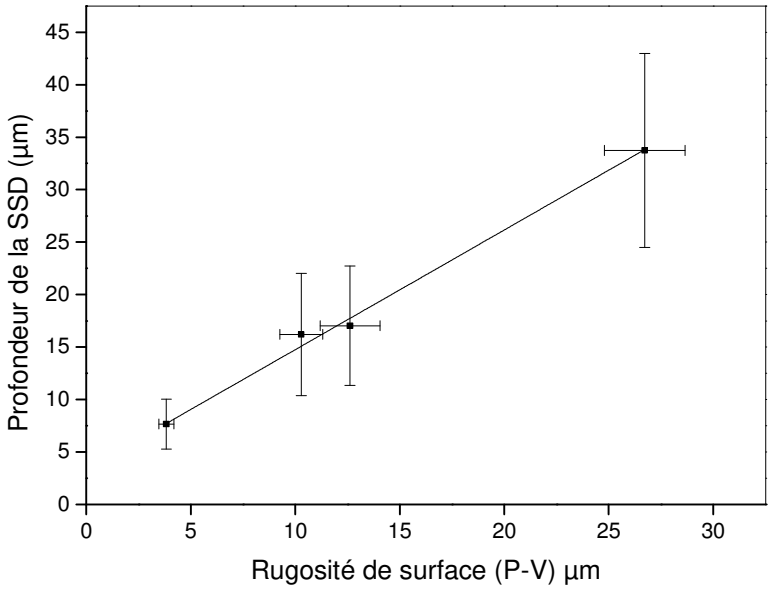



***Figure 4.30 :*** *Relation entre la profondeur de la SSD et la rugosité de surface (P-V).*

#### 4.6.2.5. Détermination de la constante de proportionnalité K :

Les résultats obtenus par différents chercheurs (réf) montrent que la profondeur de la SSD peut s'étendre jusqu'au 100 µm sous la surface en fonction du matériau et des conditions de meulage. Preston (Preston F.W. 1922) était le premier a observé que la SSD augmente proportionnellement à la rugosité de surface, la relation la plus utilisée décrivant la corrélation entre la profondeur de la SSD et la rugosité de surface était proposée par Kachalov (Kachalov N.N. 1958), elle est indiquée par l'équation (4.6). La figure 4.31 illustre l'aspect de la SSD et la SR dans le processus de meulage.

$$a = K * Rt \qquad (4.6)$$

Avec a profondeur de la SSD ; K constante de proportionnalité ; Rt rugosité totale (P-V).

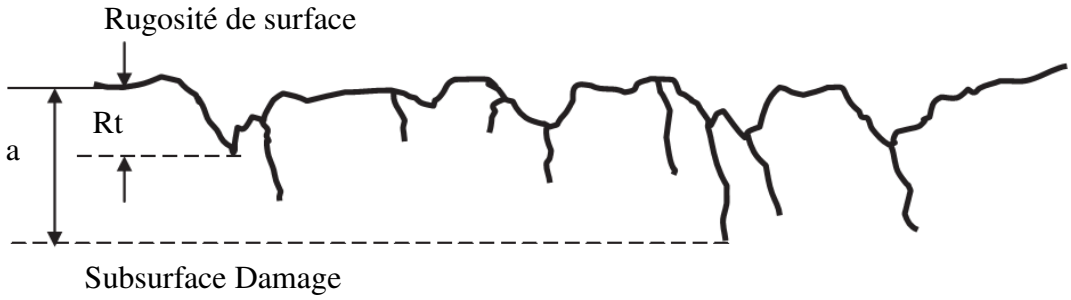



***Figure 4.31 :*** *Aspect de la rugosité de surface et de la couche endommagée SSD*

Pour pouvoir estimer la profondeur de la SSD à partir de la rugosité de surface, la connaissance de la constante de proportionnalité s'avère nécessaire. De ce fait, elle a été le sujet de plusieurs études. Les résultats qu'on a obtenus sont indiqués dans les tableaux 4.3 et 4.4.

***Tableau 4.3 :*** *Constante de proportionnalité de la vitrocéramique Zerodur®*

| | **UAG** | | | | **CG** | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **$a_p$** | 2 | 12 | 24 | 36 | 2 | 12 | 24 | 36 |
| **SR** | 3,69 | 3,85 | 4,03 | 4,84 | 2,37 | 3,76 | 4,15 | 5,03 |
| **SSD** | 11,63 | 21,14 | 26,54 | 30,31 | 24,81 | 28,11 | 33,87 | 39,17 |
| **K** | 3,15 | 5,48 | 6,59 | 6,27 | 10,45 | 7,47 | 8,15 | 7,79 |

***Tableau 4.4 :*** *Constante de proportionnalité du verre sodocalcique.*

| | **F7** | **F28** | **F40** | **F80** | **UAG-D46** | **CG-D46** |
|---|---|---|---|---|---|---|
| **SR** | 3,04 | 7,46 | 10,37 | 21,66 | 2,35 | 2,94 |
| **SSD** | 11,17 | 26,67 | 27,3 | 46,98 | 10,60 | 11,85 |
| **K** | 3,68 | 3,58 | 2,63 | 2,17 | 4,50 | 4,04 |

#### 4.6.2.6. Détermination de la courbe d'étalonnage

On a pris 150 échantillons de verre sodocalcique ayant des formes parallélépipédiques, ensuite on a effectué des essais d'indentation sur chaque échantillon à l'aide d'un micro-duromètre, par l'utilisation d'un indenteur de type Vickers, qui est une pyramide en diamant à base carrée, l'angle entre les deux faces triangulaires opposée est de 136° et entre les deux arêtes opposée est de 148°. Les charges appliquées sont les suivantes : (0.1 ; 0.25 ; 0.5 ; 1 ; 2N), et chaque charge a été effectuée sur 30 échantillons, la durée de descente de l'indenteur est de quinze secondes. Ensuite on a mesuré la longueur des deux fissures générées des deux côtés de l'empreinte (2c) de chaque échantillon, que l'on a considérée comme profondeur de la couche

endommagée, les résultats obtenus sont indiqués sur la figure 4.32. Des essais de flexion à quatre points ont été effectués sur tous ces échantillons afin de déterminer leurs résistances à la rupture, la figure 4.33 montre la relation entre la profondeur de fissure médiane qui représente la profondeur de la couche endommagée et la contrainte à la rupture, cette courbe est considérée comme courbe d'étalonnage.

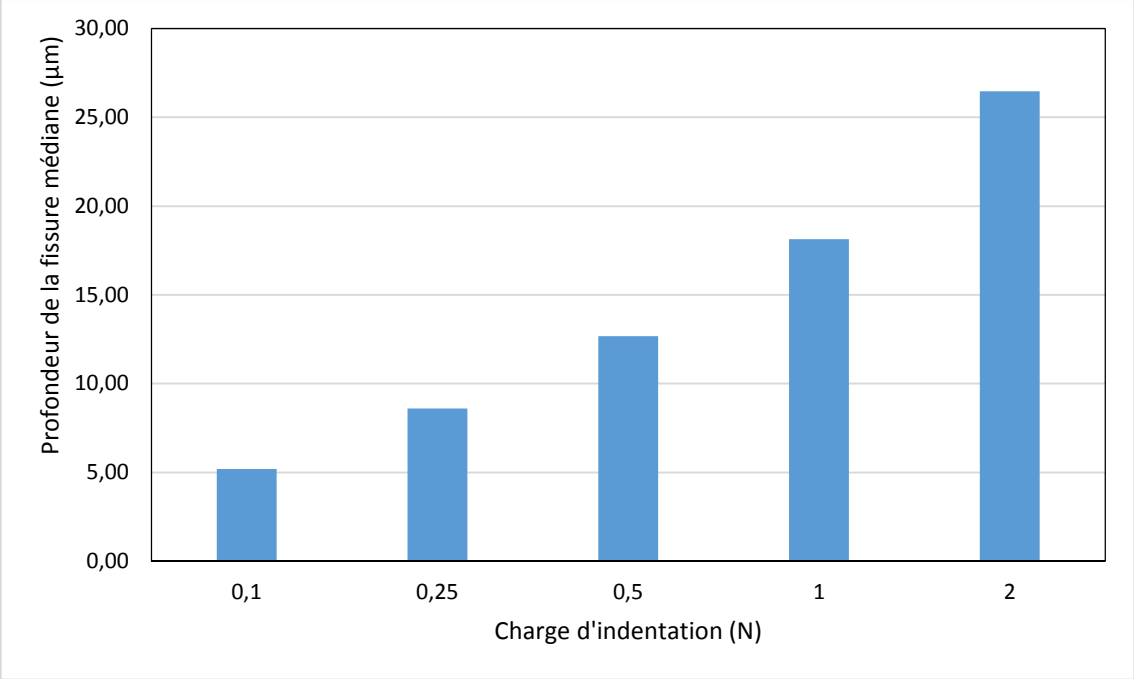



***Figure 4.32.*** *Corrélation entre la charge d'indentation et la profondeur de la fissure médiane*

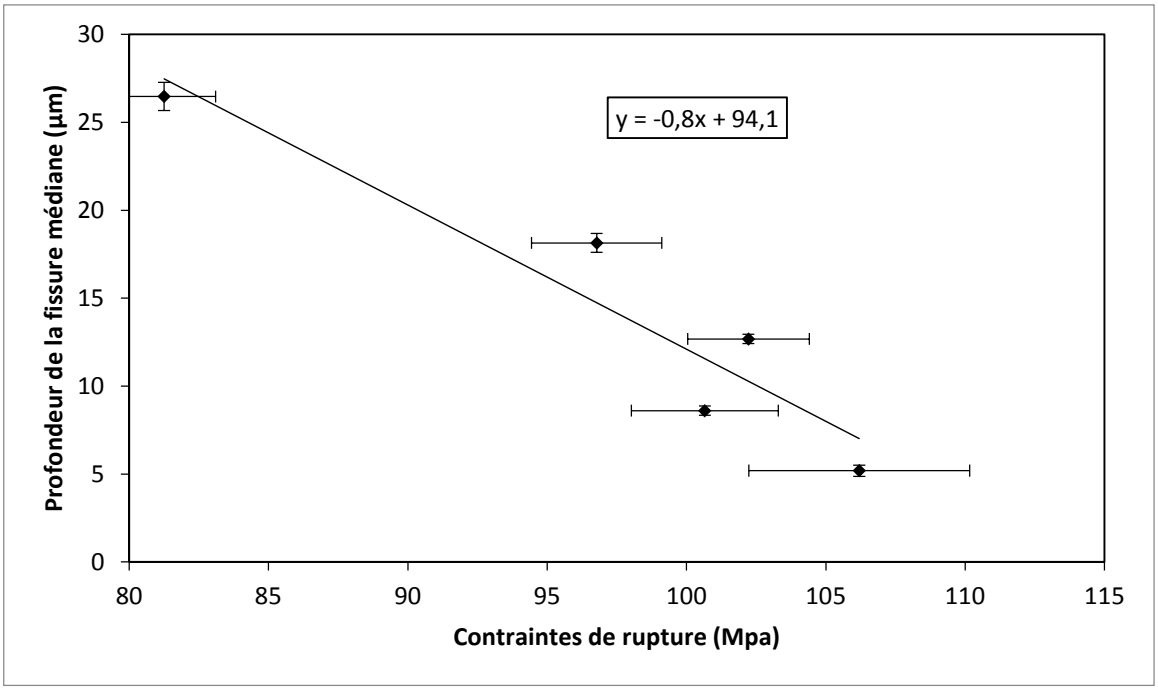



***Figure 4.33.*** *Courbe d'étalonnage.*

D'après la figure 4.18. on peut constater que les contraintes de rupture sont inversement proportionnelles à la profondeur des fissures médianes c'est-à-dire qu'elles augmentent avec la diminution de la profondeur de la fissure médiane, on peut la décrire par la relation suivante :

$$y = -0{,}8x + 94{,}1 \qquad 4.7$$

Avec

y la profondeur de la couche endommagée ; x la contrainte à la rupture.

Ceci est expliqué par le fait que les grandes profondeurs affaiblissent la résistance mécanique du matériau donc la contrainte à la rupture augmente avec les petites profondeurs et vice versa.

#### 4.6.2.7. Détermination de la contrainte à la rupture :

La figure 4.34 montre la variation de la contrainte à la rupture du verre sodocalcique par rapport à la taille des grains abrasifs, en effet la contrainte à la rupture diminue lorsque la taille des grains abrasifs est plus grande, elle est inversement proportionnelle. Les gros grains détériorent plus la surface et la subsurface qui conduit à la diminution de la résistance mécanique, ce qui peut expliquer l'allure de la courbe.

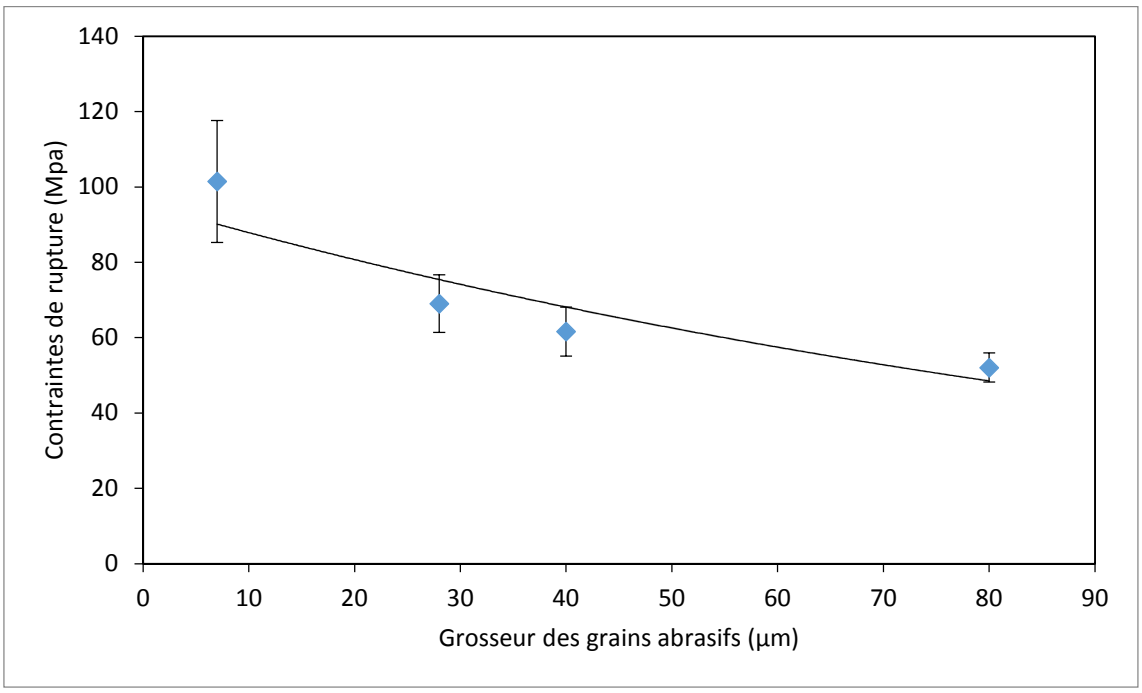



***Figure 4.34.*** *Variation de la contrainte à la rupture en fonction de la grosseur des grains*

#### 4.6.2.8. Validation de la courbe d'étalonnage :

Afin de mettre en évidence la courbe d'étalonnage obtenue, nous avons calculé la profondeur de la couche endommagée du verre sodocalcique douci par différentes tailles de grains abrasifs, en se basant sur l'équation 4.7 et la contrainte à la rupture de ces verres doucis. Pour valider la courbe d'étalonnage, les valeurs de la profondeur de la SSD obtenues par cette méthode qui est une méthode indirecte ont été comparées avec les valeurs de la SSD du verre sodocalcique doucis par les mêmes fractions mais mesurées directement par la technique de découpe d'interface, ces valeurs ont été discutées dans la section précédente. La figure 4.35 représente une comparaison entre la profondeur de la SSD obtenue par la méthode directe et la méthode indirecte.

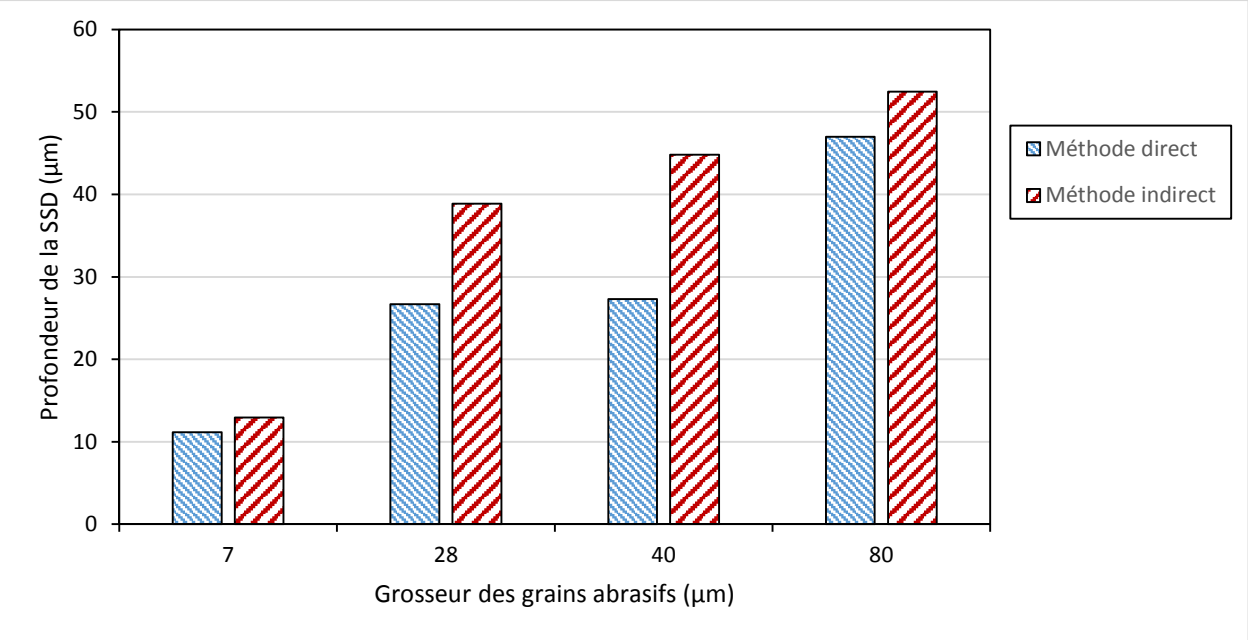



***Figure 4.35**. Comparaison entre la profondeur de la subsurface obtenue par la courbe d'étalonnage avec celle obtenue par la mesure directe.*

## 4.7. Références bibliographiques :

Barton J. & Guillemet C. 2005. Le verre : science et technologie.: EDP Sciences,.

Belkhir N., Bouzid D., Lakhedari F., Aliouane T. & Raedlein E. 2011. Characterization of glass surface damaged by alumina abrasive grains. J Non Cryst Solids 357.2882-87.

Dongxi Lv, Huang Y., Wang H., Tang Y. & Wu X. 2013a. Improvement effects of vibration on cutting force in rotary ultrasonic machining of BK7 glass. J Mater Process Technol 213.1548-57.

Dongxi Lv, Tang Y., Wang H. & Huang Y. 2013b. Experimental Investigations On Subsurface Damage In Rotary Ultrasonic Machining Of Glass Bk7. Mach Sci Technol 17.443-63.

Esmaeilzare A., Rahimi A. & Rezaei S.M. 2014. Investigation of subsurface damages and surface roughness in grinding process of Zerodur® glass-ceramic. Appl Surf Sci 313.67-75.

Hed P.P. & Edwards D.F. 1987. Optical glass fabrication technology. 2: Relationship between surface roughness and subsurface damage. Appl Opt 26.4677-80.

Hockin H., Xu K. & Said Jahanmir. 1994. Simple Technique for Observing Subsurface Damage in Machining of Ceramics J. Am. Ceram. Soc 77.1388-90.

Kachalov N.N. 1958. Technology of grinding and polishing sheet glass in Russian. [translated by W. Mao and Y. Yang, 141-142 (China Industry Press, Peking, 1965) in Chinese).].

Lambropoulos J.C., Li Y., Funkenbusch P. & Ruckman J. 1999. Non-contact estimate of grinding-induced subsurface damage. Proc of SPIE 3782.41-50.

Li D., Wang Z. & Wu Y. 2008. Relationship between subsurface damage and surface roughness of optical materials in grinding and lapping processes. J Mater Process Technol 205.34-41.

Li H.N., Yu T.B., Zhu L. & WS Wang. 2016. Evaluation of grinding-induced subsurface damage in optical glass BK7. J Mater Process Technol 229.785-94.

Miller P.E., Suratwala T.I., Wong L.L., Feit M.D., Menapace J.A., Davis P.J. & Steele R.A. 2005. The distribution of subsurface damage in fused silica. Proc. SPIE 5991, 599101.

Preston F.W. 1922. The structure of abraded glass surfaces. Tran. Opt. Soc. 23.141-64.

Randi J.A., Lambropoulos J.C. & Jacobs S.D. 2005. Subsurface damage in some single crystalline optical materials. Appl. Opt. 44.2241-49.

Sanjay Agarwal & Venkateswara Rao P. 2008. Experimental investigation of surface/subsurface damage formation and material removal mechanisms in SiC grinding. International Journal of Machine Tools & Manufacture 48.698-710.

STANDARD, INTERNATIONAL. 2008. Fine ceramics (advanced ceramics, advanced technical ceramics) — Test method for flexural strength of monolithic ceramics at room temperature In *ISO 14704:2008(E)*.

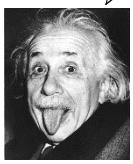
Uhlmann E. & Spur G. 1998. Surface Formation in Creep Feed Grinding of Advanced Ceramics with and without Ultrasonic Assistance. CIRP Ann - Manuf Technol 47.249-52.

Yan J., Asami T., Harada H. & Kuriyagawa T. 2009. Fundamental investigation of subsurface damage in single crystalline silicon caused by diamond machining. Precis Eng 33.378-86.

Yang F. 2005. Effect of subsurface damage on indentation behavior of ground ULETM glass. J. Non-Crystal. Solids 351.3861-65.

# Conclusion générale

*"Si tu fais toujours ce que tu as l'habitude de faire, tu récolteras ce que tu as toujours récolté. "*



*Albert Einstein*

*(1879 - 1955)*

# Conclusion générale :

Dans ce travail, nous avons étudiés l'influence de l'assistance ultrasonique dans le procédé de meulage sur la topographie de surface et la génération de la couche endommagée (Subsurface Damage SSD). La technique des fossettes (Dimple technique) a été utilisée pour déterminer la distribution et les caractéristiques de la couche fissurée créée lors du meulage de la vitrocéramique Zerodur®, tandis que la technique de découpe d'interface collée (bonded interface sectioning technique) a été adoptée pour mesurer la profondeur de la couche fissurée pendant le meulage et le doucissage du verre sodocalcique. L'étude de l'influence du mode de meulage (avec ou sans l'assistance ultrasonique) sur la profondeur de la SSD a été réalisé. Les résultats obtenus indiquent que la qualité de surface de la vitrocéramique Zerodur® obtenue par le meulage conventionnel est supérieure à celle obtenue par le meulage assisté par ultrasons. Pour les profondeurs de coupe suivantes : 2, 12, 24 et 36 µm, la profondeur SSD générée dans le meulage assisté par ultrasons est respectivement d'environ 53, 24, 21 et 22% inférieure à celle du processus de meulage conventionnel. De ce fait on peut dire que le meulage assisté par ultrasons est le plus approprié pour l'usinage de la vitrocéramique Zerodur® afin de réduire le temps de polissage dans lequel on élimine la SSD générée dans le processus de meulage ainsi que pour obtenir un bon état de surface. En mode fragile, l'enlèvement de matière est induit par arrachement en raison de la nucléation et la propagation des fissures radiales et latérales. Néanmoins, en mode ductile, le matériau est déformé plastiquement sous l'extrusion du grain abrasif, qui peut exercer une pression hydrostatique uniforme sur la tendance du matériau environnant ce qui empêche la propagation des fissures. D'autre part, une nouvelle méthode destructive a été établie afin de calculer la profondeur de la couche endommagée, cette méthode consiste à déterminer une relation entre la résistance à la rupture et la profondeur de la SSD. Les résultats obtenus par cette méthode sont en concordance avec les résultats obtenus par la mesure directe. Le meulage avec et sans l'assistance ultrasonique a été effectué sur le verre sodocalcique ainsi que le doucissage avec différentes tailles des grains abrasifs. Des essais de flexion a quatre points ont été effectués sur les échantillons meulés et doucis, les résultats obtenus nous permettent de conclure que :

- La rugosité (P-V) augmente avec l'augmentation de la grosseur des grains.
- L'assistance ultrasonique n'a aucun effet sur l'état de surface avec l'utilisation de gros grains abrasifs.

- La rugosité (P-V) est plus élevée en meulage conventionnel qu'en meulage assisté par ultrason lorsqu'on utilise l'outil D46.
- Il existe une corrélation monotone croissante linéaire entre la profondeur de SSD et la taille des grains abrasifs.
- Les dimensions des grains abrasifs ont une grande influence sur l'endommagement de la surface du verre optique.
- Le facteur de proportionnalité K nous permet d'estimer la profondeur de la SSD à partir de la rugosité totale de la surface.
- Les contraintes de rupture sont inversement proportionnelles à la profondeur des fissures médianes.
- La contrainte à la rupture diminue lorsque la taille des grains abrasifs est plus grande.

# Annexe

*“ Jamais le soleil ne voit l'ombre. “*

*Léonard De Vinci*

*(*1452 - 1519*)*

# Publication internationale :

Fouad Lakhdari, Djamel Bouzid, Nabil Belkhir & Volker Herold, ***"Surface and subsurface damage in Zerodur® glass ceramic during ultrasonic assisted grinding"***. Int. J. Adv. Manuf. Technol. Published Online 7 October 2016.

Int J Adv Manuf Technol
DOI 10.1007/s00170-016-9551-y

ORIGINAL ARTICLE

# Surface and subsurface damage in Zerodur® glass ceramic during ultrasonic assisted grinding

**Fouad Lakhdari**[1] · **Djamel Bouzid**[1] · **Nabil Belkhir**[1] · **Volker Herold**[2]

Received: 19 July 2016 / Accepted: 28 September 2016
© Springer-Verlag London 2016

**Abstract** The material removal process in grinding and lapping of brittle materials leads to different kinds of defects such as microcracks, fractures, scratches, and deformed areas which can exist under the finished surface in the layer called subsurface damage (SSD). In this work, experiments were carried out to study the impact of the ultrasonic assistance during grinding machining of the Zerodur® glass ceramic. The effect of the process parameters on the surface formation and the subsurface damage was investigated. The SSD depth was measured using the dimple method in combination with the use of the optical microscopy for the morphological study of the SSD, while the surface roughness was measured using the mechanical profilometer. The experimental results showed that the SSD depth generated within the ultrasonic assisted grinding is about 35 % less than that of the conventional grinding process. On the other hand, the surface quality obtained by the conventional grinding was superior to that of ultrasonic assisted grinding. To validate the experimental results, the SSD values measured by the dimple method are compared with the values obtained in both the experiments and other theoretical previous studies. It was concluded that machining of the Zerodur® glass ceramic with ultrasonic assistance is more suitable than that with the conventional grinding. This study provides valuable insights into the material removal mechanism and the dependence of surface and subsurface integrities on grinding mode with/without ultrasonic assistance.

**Keywords** Subsurface damage · Ultrasonic assisted grinding · Conventional grinding · Surface roughness

✉ Nabil Belkhir
belnab2002@yahoo.fr

[1] Applied Optics Laboratory, Institute of Optics and Precision Mechanics, Ferhat Abbas University, Setif 1, Algeria

[2] Otto-Schott-Institute of Materials Research, Friedrich-Schiller-University, Jena, Germany

## 1 Introduction

Zerodur® glass ceramic is characterized by an extremely low thermal coefficient of linear expansion. It is well suited for many applications such as the construction of large optical components the production of substrates for mirrors used in projection lithography of super high spatial resolution and laser gyroscopes [1–3]. Unfortunately, because of the hard and brittle nature of Zerodur® glass ceramic, machined parts contain behind deviations of geometrical parameters (shape, waviness, roughness) and other defects hidden under the surface, namely the microcracks, residual stresses, etc., in a layer called subsurface damage (SSD) [4–8]. Figure 1 illustrates the cited case, where Rt is the total roughness of the sample surface and $a$ is the depth of subsurface damages [9]. The formation of the damaged layer due to the action of the diamond tool on the surface during the machining process is caused by the sharp edges of the diamond grains bonded to the tool [10]. When the load applied on grain exceeds a critical value, the lateral and median cracks induced by the elastic/plastic field began to emerge, which are responsible for the formation of surface and subsurface damage, respectively [11]. The phenomenon is the result of the brittle material removal mechanism; it may contribute to the scattering and instability of the surface by providing sites for light absorbing impurities to reside, posing the atoms at or near the fracture surfaces to be easily ionized and modulating locally the electromagnetic field [12]. Independent of its origin, the SSD layer must be

Published online: 07 October 2016

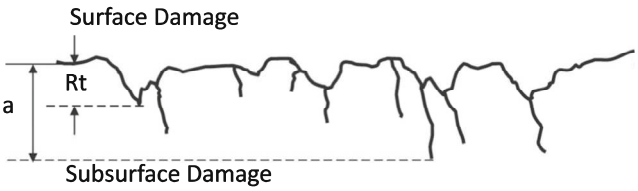



**Fig. 1** Schematic illustration of the SSD

removed in order to achieve or improve the quality of the optical component. This can be challenging, as SSD is not detectable directly by traditional optical and contact surface measurements.

Among the current machining techniques, ultrasonic vibration assisted grinding (UAG) is comparatively a novel grinding technology which is characterized by the superposition of a conventional grinding operation with an ultrasonic vibration (Fig. 2). It is a promising processing technique for optical parts by offering a possibility for the efficient and economical machining of hard and brittle materials. Prabhakar et al. [13] revealed that the material removal rate (MMR) obtained from the UAG process was nearly 6 to 10 times higher than that from conventional grinding (CG) process under the similar machining conditions. Uhlmann and Spur [14] have assumed that the UAG offers a high potential for a significant increase in material removal rate without causing super proportional subsurface damage. Qu et al. [15] have investigated the beneficial effect of high frequency vibration to reduce the subsurface damage of Pyrex glass; they have deduced that the modulations could be used to increase the MRR about 62 % and to reduce the depth of crack penetration about 24 %. Bifano et al. [16] have suggested that the critical depth of cut "$d_c$" solely depends on the properties of the materials to be machined, and they have reported that when the maximum penetration depth "$h_m$" is less than the critical depth, the material of the specimen is removed through plastic flow and the grinding mode is pure ductile. Gao et al. [17] have analyzed the critical ductile depth of cut with/without ultrasonic assistance of nano-zircona ceramics, and it was found that the ductile depth of cut has been enlarged about 30 % compared to common grinding. Lv et al. [18] discussed the subsurface damage patterns generated during the rotary ultrasonic machining (RUM) of glass BK7 process; they have investigated the subsurface damage formation mechanisms involved in formal RUM process by using RUM scratching tests and have found three types of RUM-induced subsurface damage which are pulverization, chipping, and cracking. Amini et al. [19] investigated the machinability of alumina ($Al_2O_3$) in Vibration assisted turning (VAT) with polycrystal diamond (PCD) tool. They compared the cutting parameters in VAT and conventional machining and concluded that cutting forces were reduced, surface quality was excelled, and tool wear was increased in comparison with the conventional turning condition.

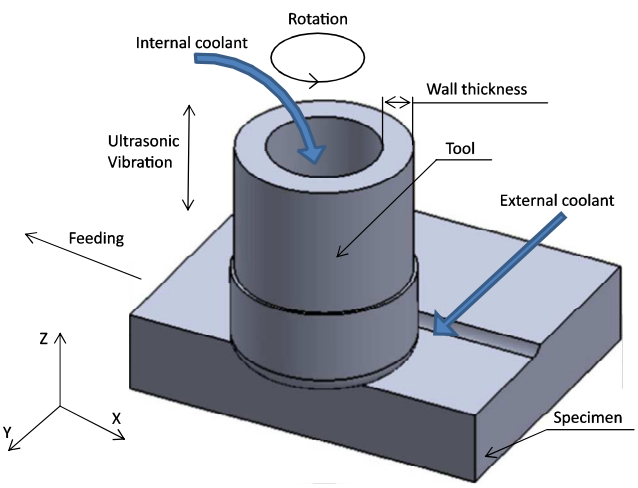



**Fig. 2** Illustration of the ultrasonic assistance vibration machining process

Despite the ultrasonic assisted machining process has been studied by worldwide researchers, the correlation between the subsurface damage depth and the machining process parameters of UAG has not been revealed yet leaving many uncertainties in improving the productivity. In order to increase strength and life of the finished machined parts, the process parameters should be optimized to reduce the subsurface damage depth. It also reduces the need for secondary processing steps, which are time and money consuming. The characteristics of the ultrasonic assisted machining induced subsurface damage strongly depend on the mechanisms of the material removal.

The present paper intended to investigate the subsurface damage depth generated during the ultrasonic assisted grinding (UAG) and conventional grinding (CG) of Zerodur® glass ceramic using the dimple technique. The resulting surface topographies with and without ultrasonic were compared to explore the mechanisms of the surface formation involved in formal UAG process. The aim of this investigation is to study the most suitable process for the machining of Zerodur® glass ceramic. Furthermore, the effect of the cutting depth in the grinding process on the SSD and the surface roughness were analyzed. However, the same parameters were examined according to the grinding process mode.

## 2 Experiments

### 2.1 Material and experimental setup

The material used in the experimental measurements was Zerodur® glass ceramic (SCHOTT AG). The physical properties of the used material are given in Table 1. Samples with dimensions of 25 mm in diameter and 12 mm in thickness were selected for this investigation. As shown in Fig. 3, the grinding wheel was metal bond cup diamond wheel, its diameter was about 24 mm, the grain size was fixed to D64, and the

**Table 1** Physical properties of Zerodur® glass ceramic

| Physical properties | Zerodur® glass ceramic |
|---|---|
| Density (ρ) [g/cm$^3$] | 2.53 |
| Thermal expansion coefficient (α) [$10^{-6}$ CTE$^{-1}$] | 0.02 |
| Modulus of elasticity (*E*) [GPa] | 90.3 |
| Poisson module (ν) | 0.24 |
| Fracture toughness (KIC) [MPa × m$^{1/2}$] | 0.85 |

wall thickness was about 5 mm. Grinding was performed parallel to the circular surface of the sample. The grinding process of the Zerodur® glass ceramic was performed with the following process conditions: feed rate 400 mm/min, grinding wheel speed 18.8 m/s, and wheel velocity 15,000 rpm. All the experimental tests were done on an ultrasonic assisted grinding machine equipped with an ultrasonic spindle kit (ultrasonic 20 linear/Sauer Ultrasonic GmbH/DMG). The ultrasonic vibration properties, with the frequency of about 20 kHz and the amplitude of about 2 μm, have been maintained constant. If the ultrasonic actuator system was shut down, conventional grinding (CG) could be realized.

The surface roughness and surface topography were measured using the mechanical profilometer Form Talysurf Laser Series 2 (Taylor Hobson Ltd.). The surface roughness represented the mean of five measurements on different locations on the surface.

### 2.2 SSD measurement

Measuring the depth of SSD is conditioned by the best visualization of the damaged area. Further, in order to allow better and easier microscopic observation of the subsurface cracks, the samples were etched using 2 % hydrofluoric acid solution for 30 s, then cleaned with distilled water in an ultrasonic bath for at least 20 min, and air-dried at an ambient temperature.

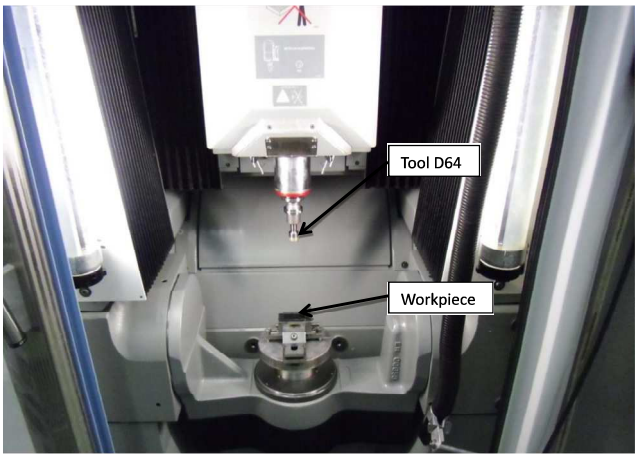



**Fig. 3** Experimental setup

After etching, the samples were ready for SSD measurements by the dimple technique. The optical observation and the SSD depth measurement were performed by an interferential optical microscope (Leica GmbH).

### 2.3 Dimple technique

The dimple technique is convenient to examine the depth of subsurface damages and distribution of induced cracks in various depths of the ground surfaces. After grinding, the dimple technique was applied for determining the SSD depth; a cylindrical-shaped polyurethane-polishing wheel with a diameter of 100 mm was used with cerium oxide abrasives in distilled water suspension (slurry) to create and polish a dimple in each ground sample of the Zerodur® glass ceramic (See Fig.4). The polyurethane-polishing wheel is fixed on the spindle of a precision milling machine to provide fine adjustment, while the sample was fixed perpendicularly to the tool. The dimple was machined with a depth of 200 μm. The SSD depth is calculated by the Eq. (1) as follows [20]:

$$\mathrm{SSD} = \frac{D_1 - D_2}{2} - \frac{D_1}{2R} - \frac{(D_1 - D_2)^2}{8R} \tag{1}$$

where $R$ is the radius of the polyurethane-polishing wheel, $D_1$ is the diameter of the dimple, and $D_2$ is the diameter of the free zone machined by the dimple process.

The measurement of the effective depth of the sample's dimple has been carried out with the mechanical profilometer.

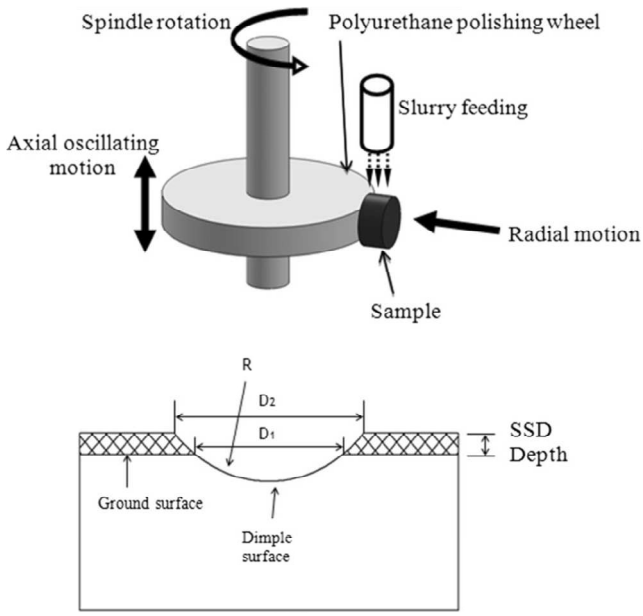



**Fig. 4** Principle of the dimple technique

## 3 Experimental results and discussion

### 3.1 Surface analysis

Figure 5 shows the surface topography of Zerodur® glass ceramic with and without ultrasonic assistance. To determine the ultrasonic effects on the surface formation mechanisms, the UAG/CG machining was conducted on the samples. The results indicate that the surface quality of the ultrasonic assisted grinding is inferior to that of the conventional grinding (CG). Indeed, fewer craters are observed during the use of the CG process with a roughness range between 0.5 and 3 μm, while it is between 0.5 and 5.5 μm in UAG. To comprehensively study the characteristics of surface integrities, the typical roughness parameters (Ra, Rz, Rt) of both grinding mode (UAG/CG) are shown in Fig. 6. In the CG process, the brittle fracture and chipping induced mainly by lateral cracking dominate the grinding process and extend below the ground surface plane. The material removal is induced by lateral cracks, that is why pits with different width and depth are generated, and the crater-like morphologies appeared (see Fig.5). The CG surfaces exhibited an intensive brittle fracture appearance, which implied that the brittle fracture is predominated on the material removal in the CG process. However, the contact conditions in ultrasonic assisted grinding are more complex. The perpendicular oscillation induced periodic variations of the cutting depth, which leads to areas with dominating brittle mode of material removal and areas with small cutting depth at the vertex of the sinusoidal trajectory of the tool, where ductile mode of material removal seems to be possible. Uhlmann [14] has proved that superimposing an ultrasonic vibration results in larger angles of engagement, shorter chip lengths, and higher depths of indentation, thus exposing both the diamond grits and the material to higher

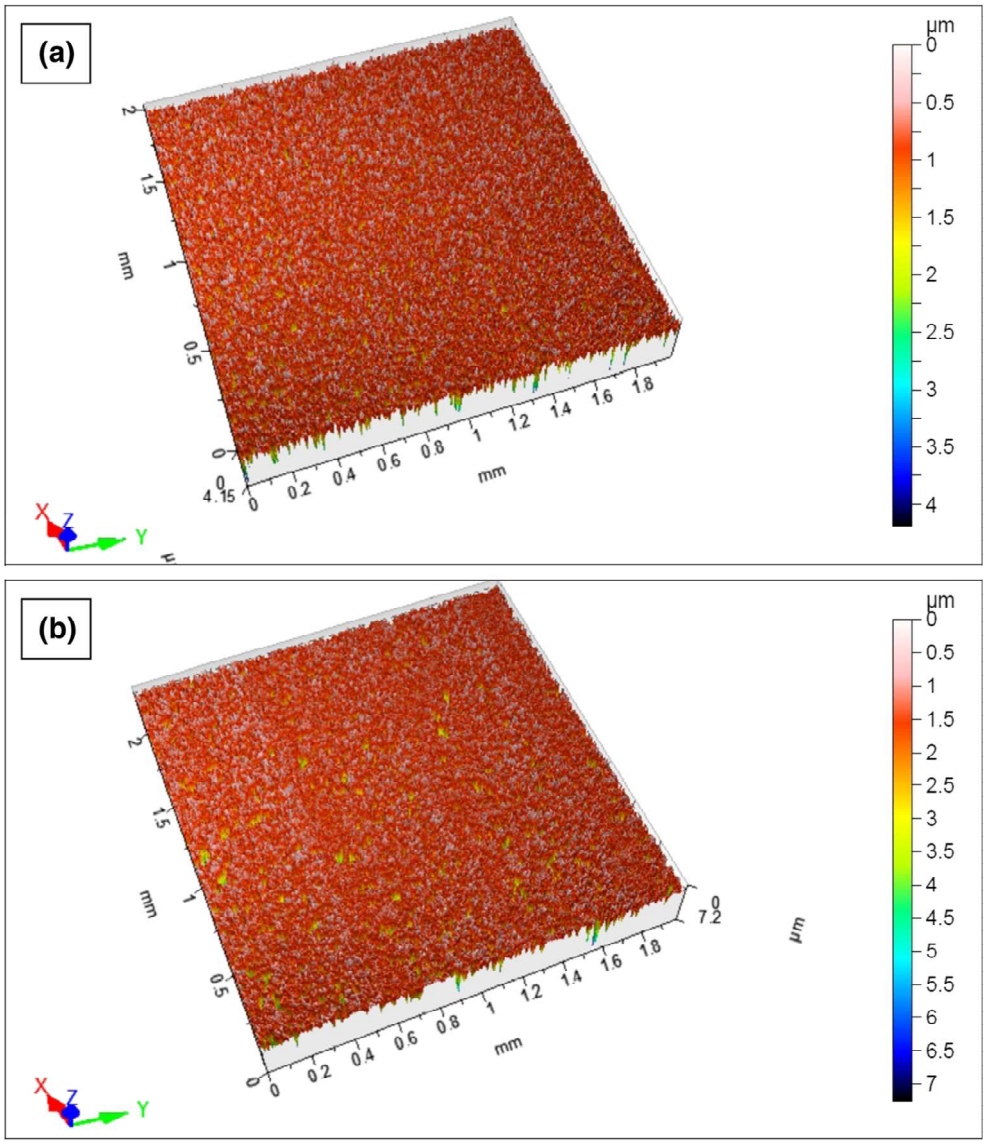



**Fig. 5** Surface topography of Zerodur® glass ceramic. **a** CG. **b** UAG

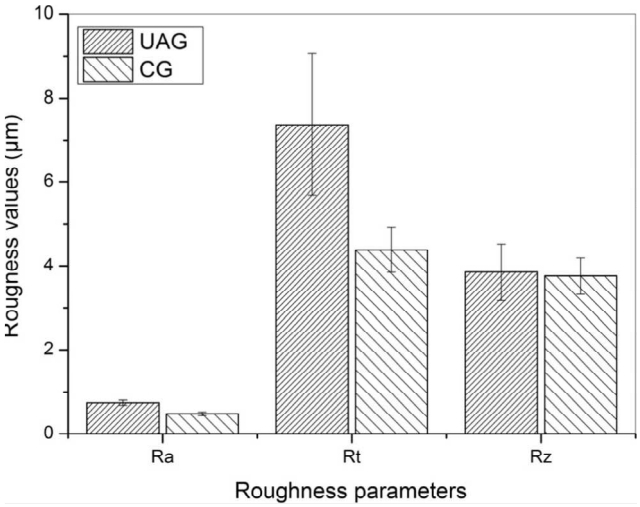



**Fig. 6** Variation of roughness values of Zerodur® glass ceramic created by UAG and CG

mechanical loads. Hence, the machined surface is fractured severely as shown in Fig. 5.

### 3.2 SSD assessment

In most cases, the grinding process is the first step of the brittle material machining, where SSD is produced. Therefore, the generated SSD depth in this step is very important and influences the time of succeeding operations and therefore the cost of optical components and their qualities. Moreover, during lapping and polishing, the surface must be improved by removing the SSD layer. Typical SSD morphology of a Zerodur® glass ceramic made by dimple technique is arrayed in Fig. 7. As the depth was increasing, the density of the crater-like morphologies gradually shrank until a certain depth for which it is observed almost completely cracks obliteration. It should be noted that the values were not obtained by direct measurement but calculated by the Eq. (1). However, three

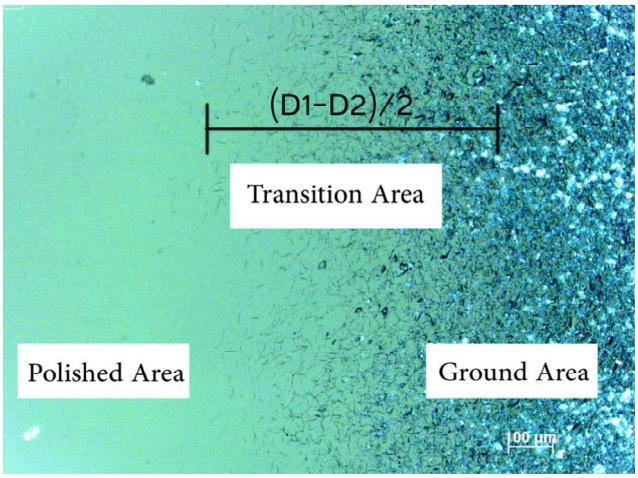



**Fig. 7** Surface topography in the dimple area

areas that become apparent are observed, a polished one produced by the dimpling process, a ground surface area created during the grinding process, which includes the structure typical for grinding of brittle materials and many cracks, and the last area was a transition zone between the ground and the polished areas. Therefore, the brittle material exhibits ductile behavior at microscale, and hence, the produced cracks and scratches are finer, although all the RUM surfaces as demonstrated by Lv et al. [18] comprised two different areas: the fractured area, similar to the morphology of the CG surface, and the pulverizable area. The authors concluded that as a comparison of the sample of BK7 glass surfaces generated with and without ultrasonic vibration, it became evident that the ultrasonic vibration seemed to affect the material removal process slightly in producing the fractured areas of the RUM surfaces.

### 3.3 Influence of the cutting depth

As shown in Figs. 8 and 9, along with cutting depth, the value of the surface roughness (P-V) and the SSD depth both in UAG and CG increase considerably as the cutting force increases with cutting depth. This has been proved by Lv et al. [21] when they have measured the RUM and CG cutting forces with respect to the depth of cut, and it was found that both the RUM and CG cutting forces were proportionally increased with the cutting depth increasing. However, the adhesion contact between the grinding wheel and the glass surface will be stronger resulting in more significant load on the diamond abrasive grains and heavier SSD. Figure 8 shows that the surface roughness obtained by UAG is higher than that obtained by the CG. This can be the result of the longitudinal ultrasonic oscillation causing damage to the workpiece surface because of its microcrush action against the workpiece leading to the formation of a pulverization layer located close the top surface of the specimen without expanding into the interior material as it has been demonstrated by Lv et al. [18]. The authors have demonstrated that the inertial effects of the material aroused by the dynamic loading of the abrasive would increase the strain rate together with the decreased dynamic fracture toughness, which induced the dynamic fragmentation of the material, forming pulverization in consequence affecting the surface. Furthermore, this phenomenon can be attributed to the presence of loose particles of the tool or workpiece that are under the effect of the longitudinal oscillation of the tool and are projected onto the surface of the sample and induce craters. Figure 9 shows that for the cutting depths 2, 12, 24, and 36 μm, the SSD depths generated within the ultrasonic assisted grinding are respectively 53, 24, 21, and 22 % less than those generated by conventional grinding process. Yan et al. [22] have proposed that as the tool starts cutting, the material around the cutting tip undergoes transition from non-metallic to metallic phase, which makes the

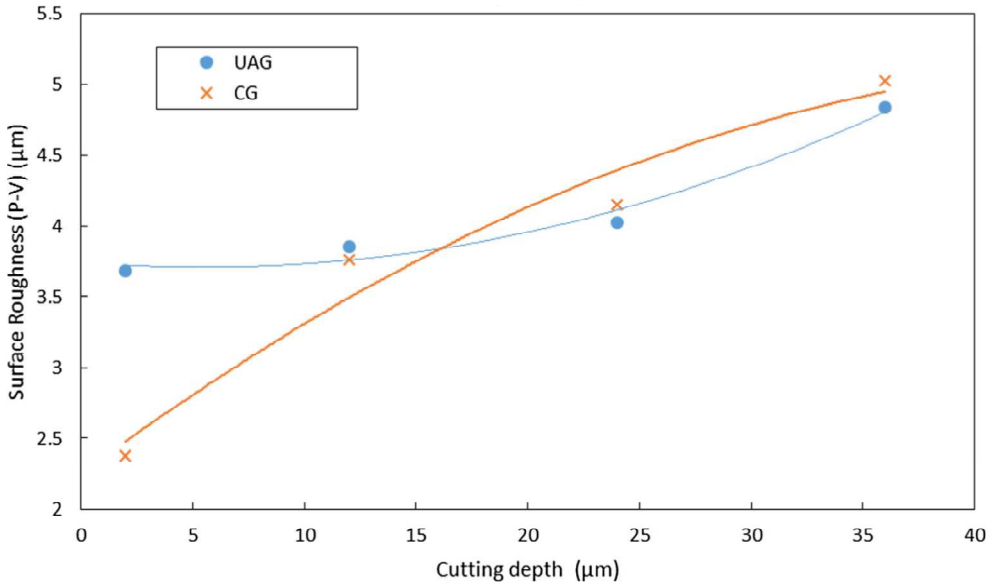



**Fig. 8** Relationship between SR and cutting depth in CG and UAG

material sufficiently ductile to sustain plastic flow and facilitates material removal in ductile mode; so immediately under the tool tip, there is radially expanding core of material, which exerts uniform hydrostatic pressure on the surrounding material. Due to the constraint imposed by the bulk material, there exists a plastic region encasing the core. However, the crack propagation cannot take place under this condition, as no tensile stress is present in that zone; this explains why the depth of SSD in the UAG is less than that in CG process.

### 3.4 Relationship between SSD depth and SR

Figure 10 shows the relationship between surface roughness and subsurface crack depth in both grinding process mode (UAG/CG) through curve fitting of measurement results. The SSD depth grows gradually with the SR increasing. There is a monotone increasing non-linear correlation between SSD depth and SR. These results are compared with those of Li model [23]. This latest model (see Eq. (2)) can evaluate the SSD values more accurately if the Rz value is less than 4.5 μm. The results indicate that with conventional grinding mode, the experimental results are in good accordance with this theoretical model. Besides, Li's model cannot predict the subsurface crack depth in the UAG mode. The SSD experimental results are lower than those of this theoretical model. The reason might be the SSD formation in UAG mode which is much more complex than the

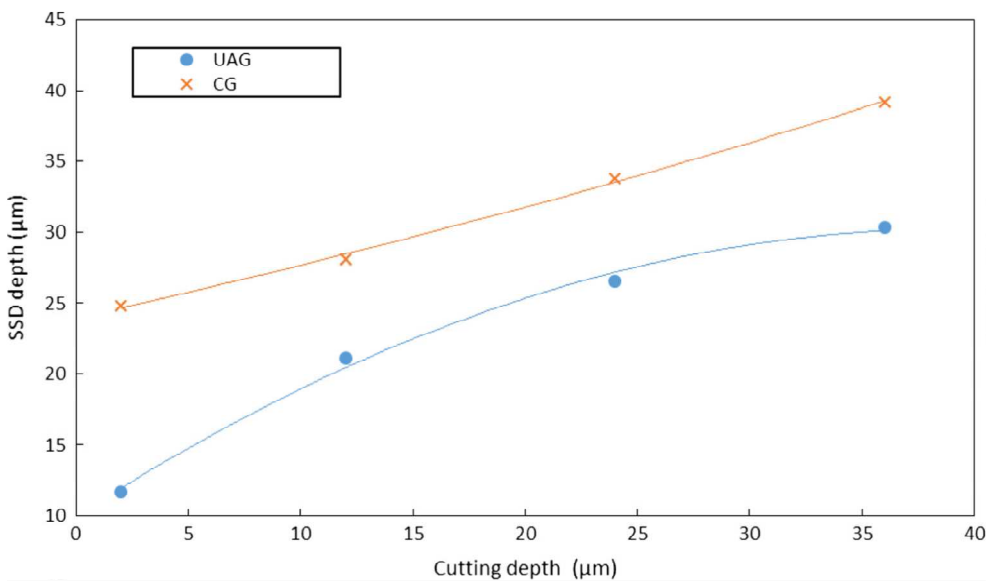



**Fig. 9** Relationship between SSD depth and cutting depth in CG and UAG processes

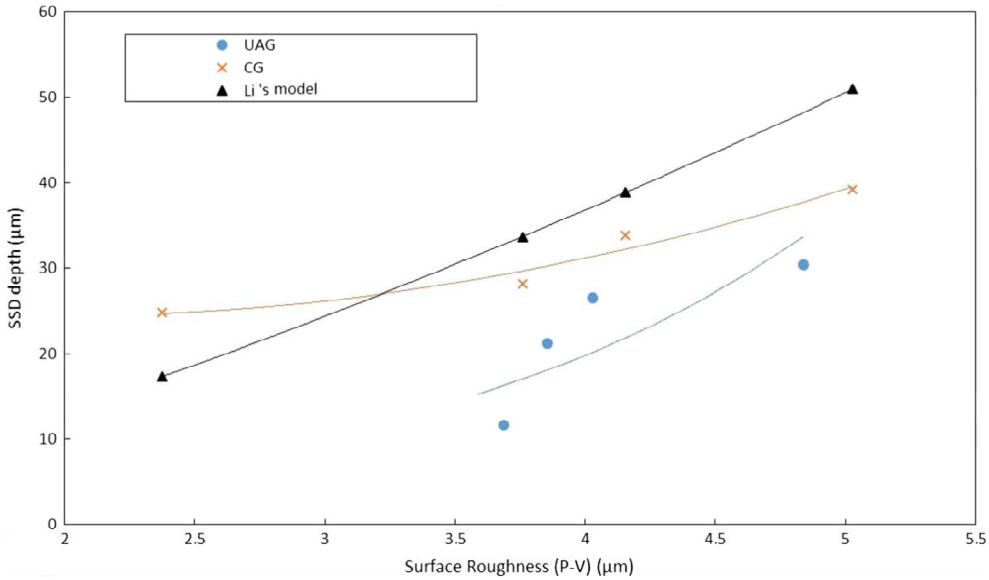



**Fig. 10** Relationship between SSD depth and SR in CG and UAG processes

mechanism of the brittle solid crack system similar to a normal or oblique loaded sharp indenter [24].

$$\mathrm{SSD} = F(R_z) = \frac{\lambda}{(K_0-1)^{4/3}}.R_z^{4/3} - \frac{1}{K_0-1}.R_z \quad (2)$$

where

$$\lambda = 0.206.\left(\frac{E^{1/2}.H_s^{1/2}}{K_c.\beta}\right)^{2/3}.\left(\cot\frac{\psi}{2}\right)^{4/9}.\left(\tan\frac{\psi}{2}\right)^{4/3} \quad (3)$$

with the Young's modulus $E$, the sharpness angle of the indenter $\psi$, the scratch hardness $H_s$, the fracture toughness $K_c$, and the elastic recovery parameter $\beta$
and

$$K_0 = \left[\frac{3(1-2\upsilon)}{5-4\upsilon} + \frac{2\sqrt{3}}{\pi(5-4\upsilon)}.\frac{E}{\sigma_y}.\cot\left(\frac{\psi}{2}\right)\right]^{1/2}.\tan\left(\frac{\psi}{2}\right) \quad (4)$$

where $\upsilon$ is the Poisson's ratio and $\sigma_y$is the yield stress.

## 4 Conclusion

In this work, the influences of UAG settings on the surface topography and the creation of the damaged layer (subsurface damage (SSD)) were studied. The dimple method was used to determine the distribution and characteristics of cracked layer created during grinding of Zerodur® glass ceramic. The investigation of the influence of grinding mode on the SSD depth and comprehensive characterization of damage features were realized. The surface quality of Zerodur® glass ceramic obtained by conventional grinding was superior to that of ultrasonic assisted grinding. In the CG mode under the selected conditions surface finish better than 0.26 μm Ra or 2.98 μm Rt is possible. For the following cutting depths 2, 12, 24, and 36 μm, the SSD depth generated within the ultrasonic assisted grinding is about 53, 24, 21, and 22 % less than that of the conventional grinding process, respectively. The ultrasonic assisted grinding is most suitable for Zerodur® glass ceramic to reduce the lapping time which is aimed to remove SSD generated in the grinding process and reduce surface roughness. In brittle mode, the material removal is induced by plowing due to the nucleation and propagation of the radial and lateral cracks. Nevertheless, in ductile mode, the material is plastically deformed under the abrasive material extrusion, which can exert a uniform hydrostatic pressure on the surrounding material trend to preventing crack propagation.

## References

1. Lindig O, Pannhorst W (1985) Thermal expansion and length stability of Zerodur® in dependence on temperature and time. Appl Opt 24:3330–3334
2. Birch KP, Wilton PT (1988) Thermal expansion data for Zerodur® from 247 to 373 K. Appl Opt 27:2813–2815
3. Döhring T., Jedamzik R., Thomas A., Hartmann P (2008) Forty years of ZERODUR® mirror substrates for astronomy—review and outlook. Proc of SPIE 7018:70183B-70181-70183B-70112
4. Shen J, Liu S, Yi K, He H, Shao J, Fan Z (2005) Subsurface damage in optical substrates. Optik 116:288–294
5. Lambropoulos J, Jacobs S, Gillman B, Yang F, Ruckman J (1997) Subsurface damage in microgrinding optical glasses. LLE Review 73:45–49
6. Kranenberg C, Jungling K (1994) Subsurface damage identification in optically transparent materials using a nondestructive method. Appl Opt 33:4248–4253
7. Wang Z, Wu Y, Dai Y, Li S (2008) Subsurface damage distribution in the lapping process. Appl Opt 47:1417–1426

8. Belkhir N, Bouzid D, Herold V (2009) Surface behavior during abrasive grain action in the glass lapping process. Appl Surf Sci 255:7951–7958
9. Belkhir N, Bouzid D, Lakhedari F, Aliouane T, Raedlein E (2011) Characterization of glass surface damaged by alumina abrasive grains. J Non-Cryst Solids 357:2882–2887
10. Suratwala T, Steele R, Feit MD, Wong L, Miller P, Menapace J, Davis P (2009) Effect of rogue particles on the sub-surface damage of fused silica during grinding/polishing. J Non-Cryst Solids 354:2023–2037
11. Agarwal S, Rao P (2008) Experimental investigation of surface/subsurface damage formation and material removal mechanisms in SiC grinding. Int J Mach Tools Manuf 48: 698–710
12. Camp D, Kozlowski M, Sheehan L, Nichols M, Dovik M, Raether R (1998) Subsurface damage and polishing compound affect the 355-nm laser damage threshold of fused silica surfaces, laser induced damage in optical materials. Proc of SPIE 3244:356–364
13. Prabhakar M, Ferreira D, Haselkorn PM (1992) An experimental investigation of material removal rates in rotary ultrasonic machining. North Am Manuf Res Inst SME 99:211–212
14. Uhlmann E, Spur G (1998) Surface formation in creep feed grinding of advanced ceramics with and without ultrasonic assistance. CIRP Ann - Manuf Technol 47:249–252
15. Qu W, Wang K, Miller M, Huang Y, Chandra A (2000) Using vibration-assisted grinding to reduce subsurface damage. Precis Eng 24:329–337
16. Bifano T, Dow T, Scattergood R (1991) Ductile-regime grinding: a new technology for machining brittle materials. J Eng Ind 113:184
17. Gao G, Zhao B, Xiang D, Kong Q (2009) Research on the surface characteristics in ultrasonic grinding nano-zirconia ceramics. J Mater Process Technol 209:32–37
18. Lv D, Tang Y, Wang H, Huang Y (2013) Experimental investigations on subsurface damage in rotary ultrasonic machining of glass Bk7. Mach Sci Technol 17:443–463
19. Amini S, Khosrojerdi MR, Nosouhi R, Behbahani S (2014) An experimental investigation on the machinability of Al2O3in vibration-assisted turning using PCD tool. Mater Manuf Process 29(3):331–336. doi:10.1080/10426914.2013.864411
20. Yang F (2005) Effect of subsurface damage on indentation behavior of ground ULE™ glass. J Non-Cryst Solids 351:3861–3865
21. Lv D, Huang Y, Wang H, Tang Y, Wu X (2013) Improvement effects of vibration on cutting force in rotary ultrasonic machining of BK7 glass. J Mater Process Technol 213:1548–1557
22. Yan J, Asami T, Harada H, Kuriyagawa T (2009) Fundamental investigation of subsurface damage in single crystalline silicon caused by diamond machining. Precis Eng 33:378–386
23. Li H, Yu T, Zhu L, Wang W (2016) Evaluation of grinding-induced subsurface damage in optical glass BK7. J Mater Process Technol 229:785–794
24. Lambropoulos J, Li Y, Funkenbusch P, Ruckman J (1999) Non-contact estimate of grinding-induced subsurface damage. Proc of SPIE 3782:41–50

**Résumé :**

Le meulage, le doucissage et le polissage sont généralement les trois étapes nécessaires à la fabrication des composants optiques. Malheureusement le meulage et le doucissage génèrent des défauts de surface et des défauts subsurfaciques dans une couche appelée « SSD SubSurface Damage ». Afin d'éliminer cette couche (SSD), sa taille doit être bien connue pour réduire le temps de polissage et produire des surfaces de très haute qualité. Dans ce travail, la couche endommagée ´SSD` de la vitrocéramique Zerodur® par le meulage avec et sans l'assistance ultrasonique à l'aide d'une machine à commande numérique (de type DMG 20 linéaire Sauer Allemagne) a été étudiée, en utilisant la technique des fossettes « Dimple technique ». La rugosité et la topographie de la surface ont été mesurées par un profilometre Taylor Hobson. L'effet ultrasonique sur la rugosité de la surface et la profondeur de la couche endommagée a été investigué. Une comparaison de la topographie de la surface généré pendant le meulage des échantillons de la vitrocéramique Zerodur® avec et sans l'assistance de vibrations ultrasoniques a été faite. En outre, l'effet ultrasonique et l'influence de la profondeur de coupe sur la qualité de la surface et la SSD ont été entrepris. Les résultats expérimentaux trouvés ont démontrés que la profondeur de la SSD générée par l'assistance ultrasonique est de 35% moins que celle générée par le procédé conventionnel.

**Abstract :**

Almost all the abrasive machining procedures for shaping the optical brittle materials, including Ultrasonic Assisted Grinding (UAG) and Conventional Grinding (CG), usually leave a subsurface damage (SSD) layer on the final surfaces which refers to the residual cracking and the elastic/plastic strain concentrating. The subsurface damage of the Zerodur® glass–ceramic produced with and without ultrasonic using D64 diamond tools was compared and characterized by means of the dimple technique, while the surface roughness was measured using the mechanical profilometer. The ultrasonic effects on the SSD characteristics were explored with respect to the material removal mechanisms and the specific kinematics principles of the abrasives. It was demonstrated that the increased cutting depth would deteriorate SSD depth of the RUM/CG Zerodur® glass–ceramic. On the other hand, the surface quality obtained by the conventional grinding was superior to that of ultrasonic assisted grinding. The relationship between subsurface damage depth and process conditions in grinding processes and material mechanical properties is discussed. It was found that there exists monotone increasing non-linear correlation between subsurface damage depth and surface roughness (P − V) in optical grinding. The experimental results showed that the SSD depth generated within the ultrasonic assisted grinding is about 35% less than that of the conventional grinding process.