

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de L'Enseignement Supérieur et De la Recherche Scientifique

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE



DEPARTEMENT DE GENIE MECANIQUE

Projet de fin d'études
Pour l'obtention du diplôme
D'Ingénieur d'Etat en Génie Mécanique

**Caractérisation des états de surface
en mesure 3D sans contact**

Proposé et dirigé par :
M^r.M.BOUAZIZ
M^r.D.SAIDI

Etudié et Présenté par :
M^{lle}. BENIDIR.ouassila

Promotion : juin 2009

Dédicace

Je dédie ce modeste travail :

A mon père que je remercie pour son éternel et infatigable soutien, toujours présent depuis ma naissance à ce jour.

A ma mère, ma grande amie qui m'a protégé, soutenu et encouragé à regarder l'avenir avec confiance.

A mes sœurs et à mes frères.

A toute ma famille

A tous mes enseignants du primaire, moyen, secondaire et supérieur

A l'ensemble des étudiants de ma promotion, particulièrement ceux de Génie Mécanique.

Enfin, à tous mes amis et à tous ceux que j'aime et qui m'aiment.

Ouassila

REMERCIEMENT

Je remercie avant tout DIEU le tout puissant qui m'a donné la foi, le courage et la volonté de mener à bien ce modeste travail.

Je remercie mon enseignant et promoteur M. BOUAËZ pour son soutien et ses précieux conseils.

Je remercie également Monsieur D. SAËD

J'adresse également mes remerciements à tous les membres du jury qui ont pris le soin de consulter mon document.

Mes remerciements aussi à tous mes Enseignants qui ont contribué à ma formation.

Enfin, je remercie tous ceux qui m'ont aidé de près ou de loin.

المخلص

حالياً القياسات ثلاثية الأبعاد بدون ملامسة باستعمال آلة قياس ثلاثية الأبعاد، تسمح باستخلاص الكثير من المعلومات لتمييز حالة السطح، التي تمد صورة واضحة للسطح المقاس في هذا العمل ركزنا على القياسات التي تجرى على الآلة التي تشتغل بدون ملامسة، و حساب خصائص القياسات لحالة سطح ثلاثي الأبعاد بدون ملامسة بعد حساب أخطاء القياس

الكلمات المفتاحية

قياس ثلاثي الأبعاد، آلة قياس بدون ملامسة، أخطاء القياس، مميزات حالة سطح

Résumé :

Actuellement, la mesure tridimensionnelle sans contact avec la machine tridimensionnelle (MMT) permet d'avoir beaucoup d'informations pour caractériser l'état des surfaces à partir d'un nuage des points, ce qui donne la possibilité d'obtenir une image bien claire de cette surface.

Dans ce travail, on a basé sur des mesures qui sont effectuées sur la MMT sans contact pour calculer les caractéristiques de mesure d'états de surface 3D après l'optimisation des écarts (les erreurs).

Les mots clés :

Mesure 3D, machine à mesure sans contact, les écarts de mesure, caractéristiques d'états de surface

Abstract:

Currently, the three-dimensional measure without contact with the three-dimensional machine (MMT) permits to have a lot of information to characterize the state of the surfaces from a cloud of the points, what gives the possibility to get a very clear picture of this surface.

In this work, one based to measures which are taken on the MMT without contact to calculate the characteristics of measurement of surface qualities 3d after the optimization of the variations (errors).

Key words:

Measure 3d, machine with measurement without contact, the variations of measurement, characteristic of surface qualities

Sommaire :

Introduction Général	1
Chapitre I : Généralités	3
I. Généralités sur le contrôle dimensionnel	3
I.1. Différentes méthodes de métrologie dimensionnelle	3
II. Tolérances	4
II.1. Système ISO	4
II.2. Types et désignations des tolérances	5
II.2.1. Tolérances dimensionnelles	5
II.2.2. Tolérances géométriques	6
II.2.2.1. Indication d'un élément	7
II.2.2.2. Direction de mesure	8
II.2.2.3. Principes de cotation	9
II.3. Tolérances et états de surface	10
II. Conclusion	10
Chapitre II : Etats de surface bidimensionnelle	11
I. Introduction	11
II. But d'étudier état de surface	11
III. Thermologie	12
III.1. Concept GPS et normes d'état de surface	12
III.1.1. Concept GPS	12
III.1.2. Normes d'état de surface	13
III.2. Surface	13

IV. Analyse d'une surface	14
IV.1. Etude de profil	14
IV.1.1. Types de profils	14
IV.1.2. Caractéristiques d'état de surface réelle	15
IV.2. Types de défauts	15
IV.3. Paramètres d'état de surface	17
IV.3.1. Paramètres liés au motif du profil	17
IV.3.2. Paramètres liés à la ligne moyenne	18
IV.4. Procédures de calcul des paramètres de rugosité	19
V. Spécification des états de surface	20
V.1. Indication sur les dessins de définition	20
V.2. Méthode d'élaboration et mesure des caractéristiques d'état de surface ...	21
V.2.1. Méthode de la ligne moyenne	21
V.2.2. Méthode de la ligne enveloppée supérieure	21
V.2.3. Méthode de la courbe de portance	22
VI. Appareils de mesure	22
VI.1. Les palpeurs	23
VI.1.1. Procédure	23
VI.1.2. L'étalonnage des palpeurs	24
VI.2. Les appareils optiques	24
VI.2.1. Principe	24
VI.2.2. Palpeurs optiques différentiels	25
VI.2.3. Détermination de la rugosité par les microscopes	26
VI.1.2.3.1. Microscopes à effet tunnel	26
VI.1.2.3.2. Microscopes à balayage laser	27
VII. Conclusion	28

Chapitre III : Caractéristiques d'état de surface 3D sans contact	29
I. Représentation des éléments tolérances et les références en 3D	29
I.1. Ensemble de points mesurés sur une surface réelle	29
I.2. Eléments géométriques de substitution	30
I.3. Ensemble de points construits	30
II. L'intérêt de l'étude 3D des états de surface	30
II.1. Définitions et éléments constituent une texture	31
II.1.1. Définitions	31
II.1.2. Isotropie, anisotropie	31
III. Les critères et paramètres de définition d'état de surface 3D	32
III.1. Rugosité	32
III.1.1. La norme ISO 25178	33
III.1.2. Mesure de la rugosité	34
III.2. Les caractéristiques d'états de surface 3D	35
IV. La mesure 3D des états de surface sans contact	42
IV.1. Classification générale de la mesure 3D optique	42
IV.2. Les techniques de mesure tridimensionnelle	43
IV.2.1. Les techniques de mesure sans contact	43
IV.2.1.1. Microscopes	43
IV.2.1.2. Interférométries	43
IV.2.1.3. Technique de stéréovision	44
IV.2.1.4. Technique de triangularisation	45
IV.2.2. Les techniques de mesure tridimensionnelle avec contact	46
IV.3. Machine de mesure tridimensionnelle	46
IV.3.1. Caractéristiques de la MMT	46
IV.3.2. Calibrage du capteur	47
IV.3.3. Principe de numérisation	49
IV.3.4. Sources des erreurs lors du mesurage	50
IV.3.5. Système de traitement des mesures	50
IV.3.5.1. Utilisation des logiciels	51
IV.3.6. Influence de la direction de la lumière sur un nuage capté	52
IV.4. Récapitulation de la procédure de mesure sans contact	53
IV.5. Avantages et inconvénients de la procédure sans contact	54
V. Conclusion	54

Chapitre IV : Application sur des pièces industrielles	55
I. But	55
II. Termes métrologie généraux	55
III. Mesurage et interprétations des résultats	57
III.1. Mesurages	57
III.1.1. Les conditions de mesure	58
III.1.2. Matériel utilisé	58
III.1.3. Mesurages	58
III.1.4. Optimisations	58
III.2. Résultats et interprétations	72
IV. Conclusion	88
Conclusion Générale	89

Bibliographies

Annexes

Liste des figures :

Fig. I.1. Désignation de tolérance pour une pièce lisse	5
Fig. I.2. Indication d'un élément tolérancé	7
Fig. I.3. Indication d'un élément de révolution	7
Fig. I.4. La bonne direction de mesure	8
Fig. I.5. Direction de mesure pour des surfaces quelconques	9
Fig. II.1. Profil brut	14
Fig. II.2. Types de défauts	16
Fig. II.3. Profondeur moyenne et pas moyen d'ondulation	17
Fig. II.4. Profondeur moyenne et pas moyen de rugosité	18
Fig. II.5. Ecart moyen arithmétique du profil	19
Fig. II.6. Quelques types des palpeurs	23
Fig. II.7. Etalonnage des rugosimétries	24
Fig. II.8. Microscope interférentiel à polarisation pour l'étude de la rugosité	25
Fig. II.9. Microscope à effet tunnel	26
Fig. II.10. Dispositif à laser pour contrôler la rectitude d'un miroir	27
Fig. III.1.Représentation de la texture	32
Fig. III.2.Représentation l'état de surface d'une pièce	34
Fig. III.3.Diagramme du volume matériel pour une surface d'une pièce	40
Fig. III.4. Principe d'interférométrie de speckle	44
Fig. III.5. Principe de stéréovision	45

Fig. III.6. Projection de franges et triangulation	45
Fig. III.7. Représentation de la MMT Renault Automation	46
Fig. III.8. Liaison articulés et motorisée avec des angles de rotation	48
Fig. III.9. Visualisation de qq positions de quantification du capteur	48
Fig. III.10. Schéma de principe du capteur laser sans contact à nappe planes	49
Fig. III.11. Les directions de la lumière	49
Fig. III.12. Réflexion uniforme ou Lambertienne	53
Fig. IV.1. Représentation le plan optimal	59
Fig. IV.2. La distance orthogonale d'un point par rapport à un plan optimal	61
Fig. IV.3. Représentation d'un cylindre	62
Fig. IV.4. La distance d'un point par rapport à la circonférentiel d'un cylindre ...	66
Fig. IV.5. Optimisation d'une sphère	67
Fig. IV.6. La distance par rapport à la sphère	71
Fig. IV.7. Dispositif expérimental de caractérisation géométrique du plan laser ...	73
Fig. IV.8. Représentation de la pièce plane brut en 3D sur Solid Works	73
Fig. IV.9. Représentation de la pièce plane sur Matlab	74
Fig. IV.10. Séparation des plans	74
Fig. IV.11. Représentation des erreurs de mesure, pièce en boit	75
Fig. IV.12. Représentation de la pièce avec les écarts.....	75
Fig. IV.13. Graphe de la rugosité pour la pièce brut	76
Fig. IV.14. Graphe de la rugosité, pièce brute scanné sur Perthometer S8P 5.6	76
Fig. IV.15. Représentation de la pièce (plan en aluminium)	79
Fig. IV.16. Séparation des points pour la pièce en aluminium	79

Fig. IV.17. Représentation des erreurs	80
Fig. IV.18. La représentation de la pièce avec les erreurs	80
Fig. IV.19. Graph de la rugosité pour plan en aluminium.....	81
Fig. IV. 20 Représentation du profil de la rugosité scanné sur Perthometer S8P 5.6 ..	81
Fig. IV.21. Représentation d'un cylindre brut	82
Fig. IV.22. Séparation des points pour un cylindre brut	82
Fig. IV.23. Représentation de la pièce avec les écarts	82
Fig. IV.24. Graph de la rugosité pour le cas d'un cylindre brut	83
Fig. IV.25. Graph expérimental de la rugosité pour la pièce brute	83
Fig. IV.26. Représentation d'un cylindre lisse	84
Fig. IV.27. La pièce optimisée	84
Fig. IV.28. La représentation des écarts pour un cylindre lisse	84
Fig. IV.29. Graph de la rugosité pour la pièce de surface lisse	85
Fig. IV.30. Graph de la rugosité pour le cylindre lisse scanné.....	85
Fig. IV.31. Représentation d'une sphère	86
Fig. IV.32. Regroupement de la pièce avec les écarts	87
Fig. IV.33. Graph de la rugosité de la surface sphérique.....	87
Fig. IV.34 La représentation les valeurs expérimentales de la rugosité	88

Liste des tableaux :

Tableau IV.1. Les résultats obtenus après l'optimisation	74
Tableau. IV.2 Paramètres caractéristiques des états de surfaces mesurées	77
Tableau. IV.3 Paramètres caractéristiques des états de surfaces calculées	78

INTRODUCTION GENERALE

La métrologie est définie comme étant une science de mesure. Elle s'applique à l'ensemble des domaines relatifs aux mesures de grandeurs. De point de vue de ces grandeurs, on distingue la métrologie technique, médicale...etc....

La métrologie est une science qui conditionne les autres, ses lois s'appliquent dans toutes les disciplines, et ses progrès sont étroitement liés à ceux de l'expérimentation. Elle indique à l'opérateur, les meilleures conditions expérimentales à utiliser, le degré de confiance qu'il peut placer dans les résultats qui lui sont fournis et au constructeur. Les règles à observer dans la conception des instruments peuvent atteindre le résultat désiré. [1]

La métrologie actuelle a même permis d'automatiser la mesure dans le but d'aboutir à la valeur vraie de la grandeur désirée.

De nos jours le développement de la technologie influe sur les techniques utilisées dans l'industrie mécanique (par exemple CAO), l'industrie chimique ..., ceci conduit à obtenir des erreurs de fabrication de plus en plus faible.

Pour réaliser une pièce on passant par divers procédés d'usinages (tournage, fraisage, rectification, rabotage,...), qui laissant tous des degrés plus au moins important de défaut de surface. La norme NF E 05-515 distingue six ordres de défauts de surface :

- Ecart de forme (échelle macroscopique) ; défaut de planéité, de rectitude
- Ondulation (échelle macroscopique) ; l'écart entre les crêtes est compris entre 0,5 et 2,5 mm
- Stries et sillons (défauts périodiques ou pseudopériodiques, échelle microscopique) ; l'écart entre les crêtes est inférieur ou égale à 0,5 mm
- Défauts localisés (échelle microscopique) ; marque d'outil, arrachement, fente, pique ;

- Structures cristalline (échelle mésoscopique) ; modèle TLK (Terrace Ledge Kink), c'est un modèle de représentation d'une surface et des ses défauts à l'échelle atomique.
- Réseau cristallin (échelle nanoscopique) ; dislocation et défaut ponctuel, la dislocation est un défaut linéaire correspondant à une discontinuité dans l'origine de la structure cristalline. [2]

Pratiquement, il est impossible d'obtenir la vraie valeur de la grandeur mesurée et aussi une géométrie parfaite de la pièce réalisée : ceci vient du fait que toute mesure est entachée d'erreurs. Cependant pour dire qu'une valeur de la grandeur considérée est acceptée ou refusée, on établit une tolérance pour laquelle lorsque l'erreur de fabrication est encadrée dans cet écart, on dira que la grandeur mesurée est acceptée, dans le cas contraire, elle sera refusée. Un contrôle a pour objet de donner l'information à l'opérateur sur la technique qu'il utilise et la pression qu'il doit obtenir. Le contrôle est indispensable dans tous les domaines de l'industrie et du laboratoire pour tous les aspects du produit fini. [1]

La métrologie peut se définir donc comme étant la science de la mesure associée à l'évolution de son incertitude, cette science est développée dans les laboratoires industriels ou entreprises utilisatrices d'instruments de mesure, elles visent à fournir des moyens de mesure plus précise qui permettent d'éliminer au maximum des erreurs de mesure et défauts de surface. [3]

Dans notre projet, on s'intéresse à étudier les défauts qui dominant sur une surface des pièces industrielles, à partir de cette étude on abouti à déterminer les caractéristiques de mesure d'états de surface à partir des méthodes numériques et on les comparait avec les résultats expérimentales.

Chapitre I :**GENERALITES****I. Généralités sur le contrôle dimensionnel :**

Contrôler veut dire vérifier si certaines consignes ont été respectées ou non. Le contrôle peut être subjectif c'est-à-dire basé sur les perceptions sensorielles, sans utilisation d'un instrument, ou objectif, c'est-à-dire à l'aide d'un moyen de contrôle.

Pour la fabrication mécanique, seul le contrôle objectif peut être retenu. Un contrôle efficace doit être total, c'est-à-dire s'exercer à tous les stades de transformation de la matière.

On distingue deux formes de contrôle : le contrôle actif et le contrôle passif

- **Le contrôle actif** s'applique aux pièces *en cours de fabrication* ou d'usinage.
- **Le contrôle passif** s'applique aux pièces finies pour assurer de leur validité. Actuellement, il existe une tendance à l'augmentation de la précision de l'ajustement, ceci impose une diminution des tolérances. [1]

Le contrôle doit satisfaire les conditions suivantes :

- Qualité ; une bonne précision géométrique
- Quantité ; une production totale
- Délais ; un temps minimisé
- Prix de revient ; économique

I.1. Différentes méthodes de métrologie dimensionnelle :

On distingue les procédés :

- Mécanique
- Electrique
- Optique
- Pneumatique
- Radioactif
- Optico-mécanique

Suivant la construction du système on peut effectuer une méthode de mesure convenable, celle-ci peut être :

- Méthode à contact
- Méthode sans contact : lorsqu'il n'y a pas contact entre l'appareil et la pièce à contrôler, qui élimine les erreurs dues à la surface de contact ainsi que la déformation de la surface mesurée. Pour la réalisation des mesures sans contact, on emploie des appareils basés sur la pneumatique, électronique, l'optique.

Un contrôle à pour but de donner des meilleurs résultats qui sont effectués sur une pièce par exemple. Donc il a fallu tolérer la dimension effectivement réalisée pour qu'elle soit comprise entre deux dimensions limites, compatibles avec un fonctionnement correct de la pièce, la différence entre ces deux dimensions constitue la tolérance. [3]

Les cotes nominales indiquées sur le plan d'exécution doivent toujours être accompagnées de la mention de tolérance de fabrication, on applique les tolérances normalisées suivant la norme ISO.

II. Tolérances :

Une pièce est définie par :

- Sa forme nominale ; limitée par des surfaces simples (plan), complexes (surfaces de Bézier). Cette pièce est définie par des dessins conventionnels, soit par des équations mathématiques(CAO).
- Ses dimensions nominales qui sont définies par des valeurs numériques.

II.1 Système ISO :

Le système ISO définit un ensemble de tolérances concernant la taille linéaire d'un élément c'est-à-dire

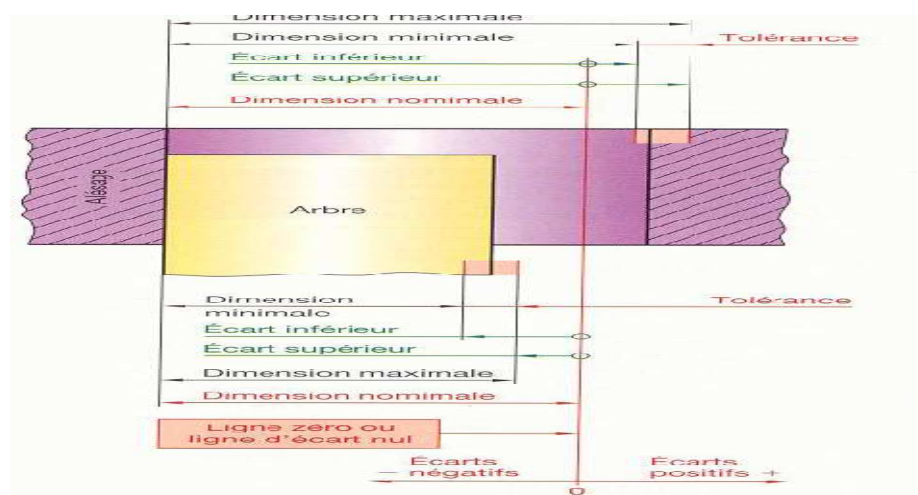
- Le diamètre d'un cylindre
- Le diamètre d'une sphère
- La distance entre deux surfaces planes opposées.

II.2.1 Types et désignations des tolérances :

II.2.1.1 Tolérances dimensionnelles :

Une pièce ne peut être réalisée à une dimension rigoureuse fixée d'avance. Afin que cette pièce puisse répondre à sa fonction, il suffit que sa dimension soit comprise entre deux limites admissibles dont la différence constitue la tolérance dimensionnelle.

La vérification de cette pièce s'effectue soit en calculant les valeurs des dimensions limites de la pièce réelle qui sont fixées par les écarts extrêmes que la dimension réelle peut présenter par rapport à la cote nominale, ces écarts pouvant être positifs, nuls ou négatifs [4] (Fig. I.1)



« Fig. I.1. Désignation de tolérance pour une pièce lisse »

La tolérance dimensionnelle est la spécification qui définit la variation admissible de dimension d'un élément, elle est égale à la différence entre la dimension maximale D_{\max} et la dimension minimale D_{\min} de cet élément (arbre ou alésage). La zone de tolérance est la portion d'espace à l'intérieur de laquelle doit se situer l'élément considéré.

Si on effectue à la pièce une dimension nominale D_{nomi} et l'on définit chacune des deux dimensions limites par son écart par rapport à cette dimension nominale. L'écart s'obtient en valeur absolue et en signe en retranchant la dimension nominale de la dimension limite considérée. [5]

Alesage Ecart supérieur $ES = D_{\max} - D_{\text{nom}}$
 Ecart inférieur $EI = D_{\min} - D_{\text{nom}}$

Arbre	Ecart supérieur $es = d_{\max} - d_{\text{nom}}$ Ecart inférieur $ei = d_{\min} - d_{\text{nom}}$
-------	--

Ainsi on définit le jeu maximal J_{\max} qui est égale à la différence entre la dimension maximale et minimale de l'arbre, tandis que le jeu minimal J_{\min} est égal à la dimension minimale de l'alésage moins la dimension maximale de l'arbre.

Jeu maximal $J_{\max} = D_{\max} - d_{\min}$

Jeu minimal	$J_{\min} = d_{\max} - D_{\min}$
-------------	----------------------------------

Remarque :

Dans le cas de deux pièces ajustées, les écarts et les tolérances sur chacune d'elles doivent être déterminés pour donner dans les cas extrêmes un jeu techniquement admissible. Suivant la position respective des zones de tolérance de l'alésage et de l'arbre, l'ajustement peut être avec jeu, incertain ou avec serrage.

II.2.1.2 Tolérance géométrique :

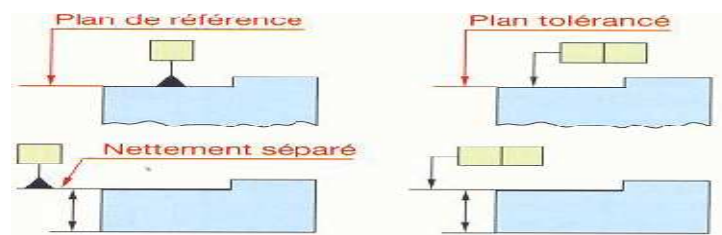
Les dimensions nominales d'une pièce ne peuvent être réalisées parfaitement, ainsi sa forme nominale, et il peut être nécessaire pour la fonction de limiter aussi par des tolérances ses écarts de forme, ainsi que l'orientation et la position des surfaces entre elles. Pour les pièces en rotation, le battement permet de limiter l'ensemble de ces trois clauses par rapport à l'axe de rotation. L'ensemble de ces tolérances de forme, d'orientation, de position

et de battement constitue les tolérances géométriques. (Le détail de ces tolérances est résumé dans un tableau, l'annexe I)

II.2.2.1 Indication d'un élément :

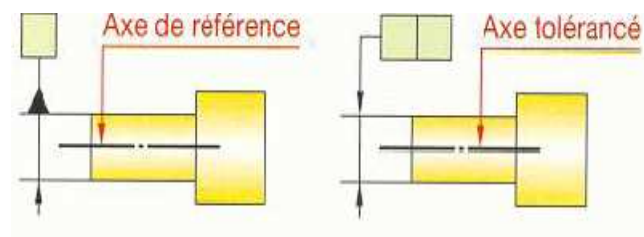
L'élément de référence est précisé par un triangle noirci ou non. L'élément tolérance est indiqué par une flèche, suivant la position du triangle ou de la flèche. On distingue deux cas :

- Si le triangle ou la flèche sont appliqués sur l'élément ou sur une ligne de rappel, la référence ou la tolérance concerne l'élément lui-même. [5] (Fig. I.2)



« Fig. I.2 Indication d'un élément toléré »

- Si le triangle ou la flèche sont appliqués dans le prolongement de la ligne de cote, la référence ou la tolérance concerne l'axe ou le plan médian ainsi spécifié (Fig. I.3).



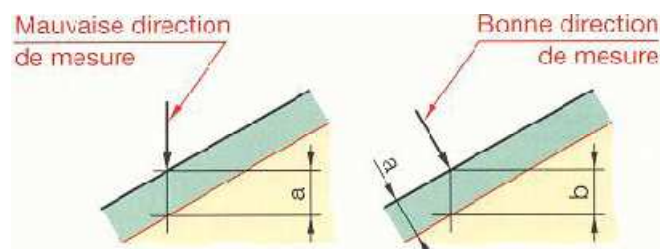
« Fig. I.3. Indication d'un élément de révolution »

Remarque :

1. Le cadre est relié à l'élément concerné par une ligne de rappel pouvant partir de n'importe quelle cote d'un cadre.
2. Les écarts de forme de l'élément de référence doivent être négligeables par rapport aux écarts à contrôler, c'est pourquoi il est nécessaire de prescrire une tolérance de forme pour la surface de référence.

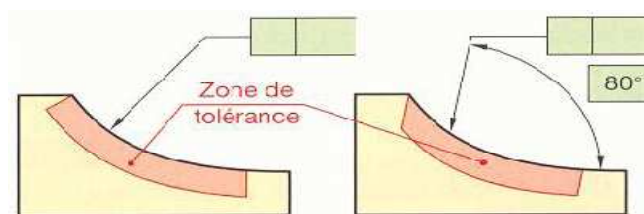
II.2.2.2 Direction de mesure :

La direction de mesure doit toujours être perpendiculaire à la surface concerné et ce quelle que soit la direction de la ligne de rappel. (Fig. I.4.)



« Fig. I.4. La bonne direction de mesure »

Pour le cas des surfaces quelconques, en l'absence de spécifications particulières, la direction de la largeur de la zone de tolérance est normale à la géométrie ou à la surface concernée. [1] (Fig. I.5)



« Fig. I.5. Direction de mesure pour des surfaces quelconques »

Si la direction de la zone de tolérances doit être différente, la direction de mesure doit être spécifiée. Dans le cas de la circularité, la largeur de la zone de tolérance et dans le plan perpendiculaire à l'axe nominal.

II.2.2.3. Principes de cotation :

• Principe de l'enveloppe :

Les écarts de forme et les écarts dimensionnels sont liés, l'ensemble de ces écarts ne devant pas dépasser l'enveloppe théorique donnée par la tolérance dimensionnelle portée au plan. Ce principe limite seulement la forme de l'entité et n'affecte pas l'orientation, la position et le battement. Il est particulièrement adapté à la cotation des pièces destinées à s'assembler.

Ce principe correspond au contrôle par calibre « entre-n'entre pas ». Pour vérifier par exemple un alésage, le tampon « entre » devrait avoir théoriquement une forme cylindrique parfaite de diamètre égal au diamètre minimal de l'alésage; le tampon « n'entre pas » serait réduit à deux pointes dont la distance correspondrait au diamètre maximal de l'alésage (principe de Taylor et d'Aboville). [4]

• Principe de l'indépendance :

Les tolérances dimensionnelles et les tolérances géométriques sont totalement indépendantes, en conséquence, les tolérances géométriques et dimensionnelles doivent être spécifiées et mesurées séparément. Ce principe est destiné à coter les éléments non destinées à s'assembler et les éléments de grande longueur, il s'applique dans le cas où la dimension elle-même a moins d'importance fonctionnelle que l'écart de forme.

Remarque :

1) Sur tous les dessins cotés suivant le principe de l'indépendance, ils doivent comporter dans ou près du cartouche la spécification « cotation suivant le principe de l'indépendance selon la norme EXP E 04-542, sauf les cotes notées E.

II.2.2 Tolérances et état de surface :

Les tolérances dimensionnelles et géométriques s'appliquent en général à l'ensemble de la surface, il est nécessaire de limiter les écarts micro géométriques de surface.

L'ondulation influe sur l'aspect et l'étanchéité, elle constitue les écarts du deuxième ordre.

La rugosité est en général sensible à l'angle de décalage d'instrument de mesure au moment de prendre les mesures, ainsi elle est influée par le frottement, l'usure... [4]

La rugosité constitue les écarts du troisième ordre.

Les piques, arrachement, la microrugosité et la structure cristallographique visibles au microscope électrique constituent les écarts du quatrième et cinquième ordre.

III. Conclusion :

Globalement le contrôle des pièces mécaniques ou autre est indispensable pour avoir un produits de qualité, alors plusieurs entreprises et laboratoires contrôle leurs produits en se référence à des normes (ISO)

Puisque, réellement on ne peut pas avoir à 100% un produit parfait, on fixe des plages (intervalle de tolérance), pour ramener ce produit à des résultats acceptables.

Chapitre II :**ETATS DE SURFACE BIDIMENSIONNELLE****I. Introduction :**

La surface d'un solide est un domaine à deux dimensions où se situent les interactions du solide avec le mode extérieur.

La métrologie des surfaces joue un rôle essentiel dans le contrôle de composantes mécaniques, optiques ou électriques. Les propriétés d'une surface sont nombreuses et complexes en cherchant à caractériser par des paramètres simples qui ne peuvent jamais donner une représentation complète de ces propriétés.

Connaitre l'influence de l'état d'une surface sur le fonctionnement d'une pièce et son comportement dans le temps nécessite de pouvoir caractériser sa géométrie, macro géométrie, micro géométrie et même nano géométrie dans certains cas. [18]

Les problèmes relatifs à la géométrie des surfaces se posent à trois niveaux :

- La conception : Quel état de surface convient à la fonction à assurer et comment doit-on le spécialiser sur un dessin technique ?
- La réalisation de la surface : Quels moyens mettre en œuvre pour obtenir l'état de surface souhaité ?
- La mesure de la surface : Quels moyens et quelles conditions de mesure pour vérifier que la surface correspond aux spécifications données ?

II. But d'étudier l'état de surface :

L'étude d'état de surface consiste à :

- Définir une pièce pour remplir une fonction donnée : dimensions fonctionnelles, tolérances géométriques,...

- Spécification et contrôle des états de surface
- L'influence d'état de surface sur le coefficient de frottement, sur l'étanchéité et sur le comportement en fatigue.

III. Thermologie :

III.1. Concept GPS et normes d'état de surface :

Pendant de nombreuses années, chaque pays a développé sa normalisation. La multiplication des échanges et la mise en place de systèmes d'assurance qualité, ont mis en évidence la nécessité d'un langage commun, univoque et reconnu de tous pour définir les spécifications d'un produit. Pour cette raison, ils ont produit le concept GPS (Geometrical Products Specification). [18]

III.1.1. Concept GPS :

La spécification géométrique des produits consiste à définir à travers d'un dessin de définition la forme, les dimensions et les caractéristiques de surfaces d'une pièce. [18]

Le concept GPS couvre plusieurs types de normes :

- Norme de base ; règle et procédure de base pour la cotation et la tolérance ment des pièces et produits.
- Globales ; règles pour tout ou partie des normes générales (température de référence, guide pour l'expression de l'incertitude...)
- Générales et complémentaires ; règles pour l'indication sur les dessins, les définitions et principes de vérification. [5]

Le concept GPS couvre ainsi plusieurs types de caractéristiques géométriques par exemple :

- Taille, distance
- Angle, forme, position, orientation
- Défauts d'état de surface

III.1.2. Normes d'état de surface :

Les états de surface ont été l'un des premiers sujets traités suivant le concept GPS on ce basant sur la matrice GPS, les normes ISO concernant les états de surfaces sont positionnées suivant cette matrice. [18]

Il existe aujourd'hui une série de normes ISO reconnues par le CEM (Concept Européen Mécanique).

Exemple :

- ISO XXXX pour la normalisation international (XXXX: un numéro)
- NF EN ISO XXXX en France
- DIN EN ISO XXXX en Allemagne

Remarque :

1) *L'instrument de mesure : palpeurs à patin ne sont pas normalisés*

III.2. surface :

La plupart du temps, les surfaces (ensemble des points du domaine frontière du corps considéré) des pièces obtenues après le procédé de fabrication choisi, sont d'une qualité suffisante pour le fonctionnement du système, par contre, dans certains cas, les qualités de ces surfaces doivent être meilleures pour garantir le bon fonctionnement. [3]

- Surface géométrique ; c'est la surface parfaite associée à la surface réelle (c'est la surface obtenue au cours de la fabrication de la pièce), définie géométriquement par des notes nominales.
- Surface spécifiée ; c'est la surface géométrique dont les limites sont les tolérances, c'est la surface indiqué par le bureau d'étude.
- Surface mesurée ; c'est la surface déterminée à partir d'instruments de mesures. Cette surface est imprécise et dépend de la technologie utilisée pour réaliser la mesure (imprécision des capteurs, forme du palpeur, qualité des appareils...)

IV. Analyse d'une surface :

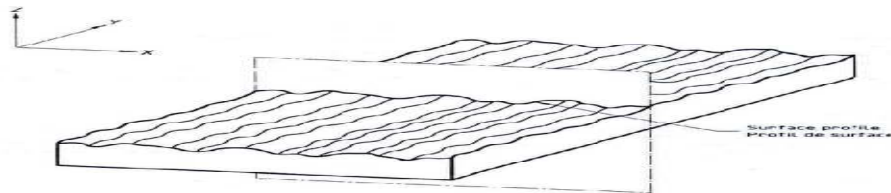
IV.1. étude de profil :

Le profil d'une surface est la ligne résultant d'intersection de la surface réelle et d'un plan spécifié.

IV.1.1.Types de profils :

D'après la norme ISO 3274, le profil est divisé en quatre types :

- **Profil brut** ; profil résultant de l'intersection de la surface et d'un plan spécifié,



« Fig. II.1. Profil brut »

Axe X ; direction de pal page

Axe Z ; axe d'enregistrement des écarts (>0 vers l'extérieur de la matière).

- **Profil primaire** :

Profil issu de profil brut après application du filtre de longueur d'onde courante λ_c qui sépare les composantes de rugosité des composantes d'onde encore plus courantes (arrachements) présentes sur la surface et après optimisation aux moindres carrés qui redresse le profil brut. Il est la base du traitement numérique du profil au moyen d'un filtre de profil et du calcul des paramètres. [19]

- **Profil de rugosité** :

Profil dérivé du profil primaire par suppression des composantes de grande longueur d'onde (ondulation) en appliquant le filtre de profil λ_g qui sépare les composantes de rugosité des composantes d'ondulation. [20]

Ce profil est intentionnellement modifié et sert de base à l'évaluation des paramètres de rugosité.

- **Profil d'ondulation :**

Profil dérivé du profil primaire par application successive des filtres de profil λ_c et λ_g . Ce profil est ainsi intentionnellement modifié et sert à l'évaluation des paramètres d'ondulation.

IV.1.2. Caractéristiques d'états d'une surface réelle :

Une surface réelle est caractérisée par plusieurs termes à définir :

- Longueur d'évaluation L ; c'est la longueur de l'échantillon de profil utilisée pour déterminer les paramètres liés à l'état de surface. Cette longueur est normalisée : 0.08, 0.25, 0.80, 2.50, 8.25 mm.
- Longueur de base l ; la longueur d'évaluation L est divisée en « n » longueurs de base ' l ' qui dépendent des irrégularités du profil.
- Ligne enveloppe supérieure LES ; c'est l'ensemble des segments de droite qui joignent les points les plus hauts des saillies locales du profil.
- Ligne moyenne ou ligne des moindres carrées ; cette ligne est une droite ayant la direction du profil sur chaque longueur de base. Elle est définie telle que la somme des aires (entre profil et ligne) au dessus de la ligne moyenne soit égale à la somme des aires en dessous de cette ligne. [6]

IV.1.3 Types de défauts :

Le profil d'une surface est obtenu par une coupe de celle-ci avec un plan normale, c'est à partir de ce profil que l'analyse de l'état de surface est réalisée. On distingue des défauts géométriques de quatre ordres de grandeur de défauts.

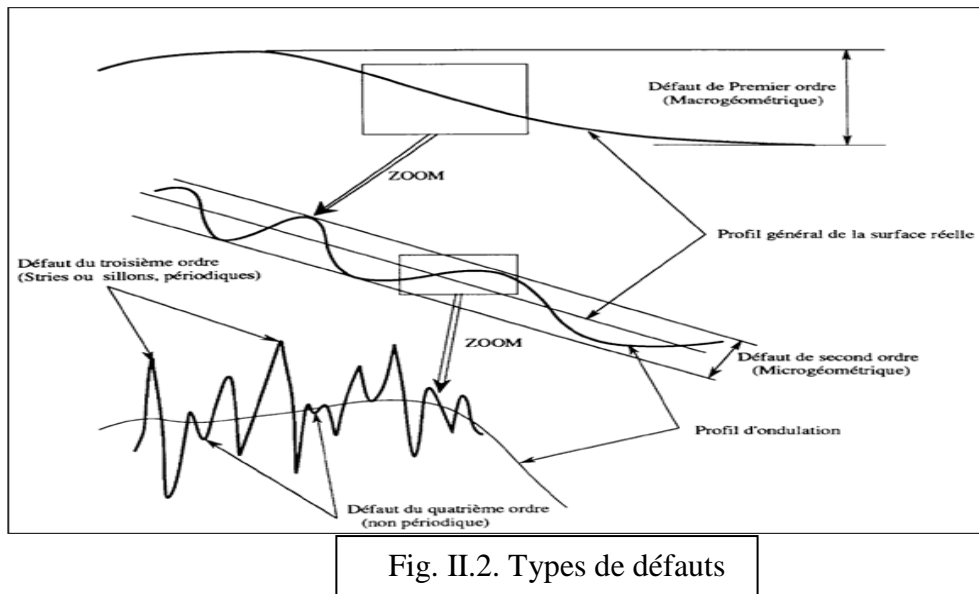


Fig. II.2. Types de défauts

- Défauts d'ordre 1 ; correspondent aux écarts de forme et de position, c'est-à-dire aux défauts géométriques des surfaces (planéité, rectitude, circularité,...)
- Défauts d'ordre 2 ; Ils sont relatifs aux ondulations inscrits dans le profil et sont représentés par une ligne ondulée caractérisée par la ligne enveloppe supérieure (LES). Ces irrégularités sont dues aux vibrations des machines à leurs défauts et aux traitements thermiques appliqués à ces surfaces.
- Défauts d'ordre 3 ; Ce sont les stries de rugosités de la surface de la pièce. Ce sont aux qui caractérisent la rugosité. Ces sillons et stries sont tracés avec régularité sur la pièce avec un pas compris entre 0.02 et 0.50 mm environ. Ils sont dus aux vibrations à hautes fréquences de la pièce et de l'outil et au mouvement d'avance lors de l'usinage.
- Défauts d'ordre 4 ; Ces défauts sont les plus irréguliers et sont souvent accidentels : arrachement de matière, fentes,..., le pas entre deux irrégularités est au maximum de 20 μm (ce sont des défauts apériodiques). [7]

IV.3. Paramètres d'état de surface:

Parmi la cinquantaine de paramètres différents permettant de caractériser les états de surface, parmi elles sont normalisés, d'autre ont disparus et le reste sont normalisés mais non utilisés. [20]

Devant le choix important, les critères les plus utilisés sont R_a ou R ce qui dans plusieurs cas satisfait plus le dessinateur que la fonction de la surface.

Seules les expériences et la connaissance de la fonction permettent de choisir les paramètres significatifs et les tolérances à y effectuer. [20]

Les paramètres d'état de surface peuvent être calculés respectivement sur le profil brut, ou après filtrage, sur le profil de rugosité ou le profil d'ondulation. [8]

IV.3.1. Paramètres liés au motif du profil:

- Profondeur moyenne d'ondulation W : c'est la moyenne des distances saillies-creux des écarts du 2^{ème} ordre

$$W = \sum_{i=1}^n (W_i/n) \quad n \geq 3 \quad \dots\dots\dots 1$$

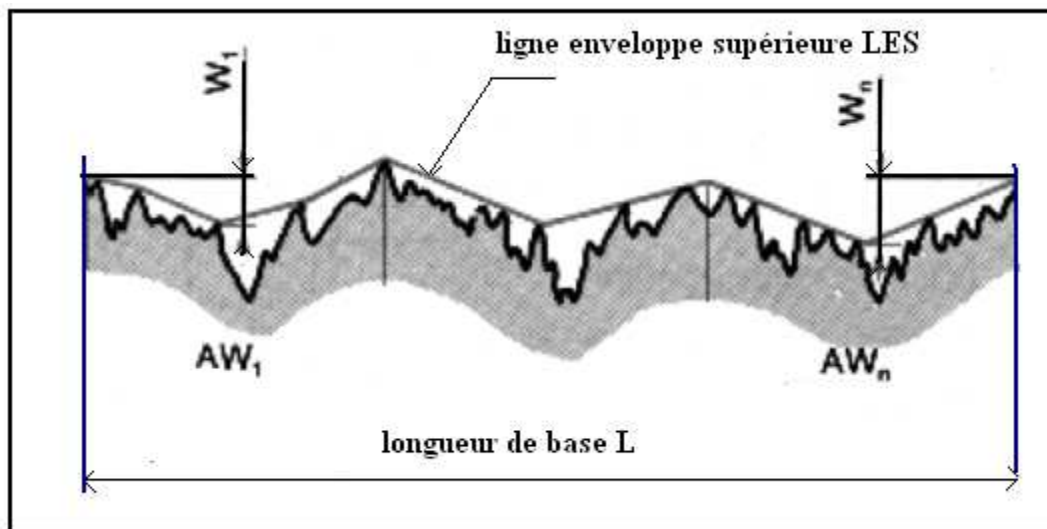


Fig. II.3. Profondeur moyenne et pas moyen d'ondulation

- Pas moyen d'ondulation W_p : c'est la moyenne des distances saillie-saillie des écarts des défauts de 2^{ème} ordre.

$$W_p = \sum_{i=1}^n (Pwi/n) \quad n \geq 3 \quad \dots\dots\dots 2$$

- Profondeur moyenne de rugosité R : c'est la moyenne des distances saillies-creux des écarts des défauts de 3^{ème} et 4^{ème} ordre

$$R = \sum_{i=1}^n (R_i/n) \quad n \geq 8 \quad \dots\dots\dots 3$$

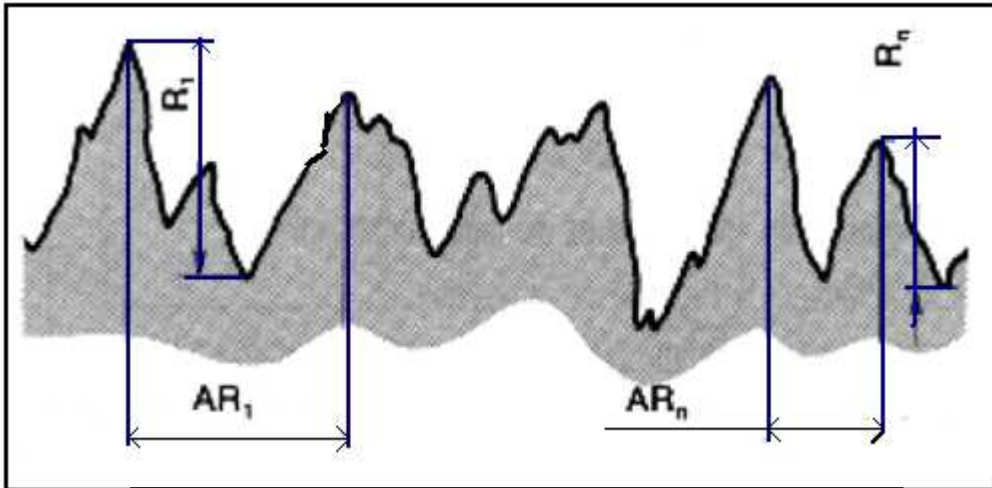


Fig. II.4. Profondeur moyenne et pas moyen de rugosité

- Pas moyen de rugosité R_p: c'est la moyenne des distances saillies-saillies des écarts des défauts de 3^{ème} et 4^{ème} ordre

$$R_p = \sum_{i=1}^n (R_{pi}/n) \quad n \geq 8 \quad \dots\dots\dots 4$$

IV.3.2. Paramètres liés à la ligne moyenne :

- Ecart moyen arithmétique du profil R_a :

Cet écart est le paramètre le plus utilisé. Il correspond à la moyenne arithmétique sur une longueur de base de toutes les distances y_i entre la ligne moyenne et le profil.

$$R_a = \frac{1}{l} \int |y(x)| dx \quad \dots\dots\dots 5$$

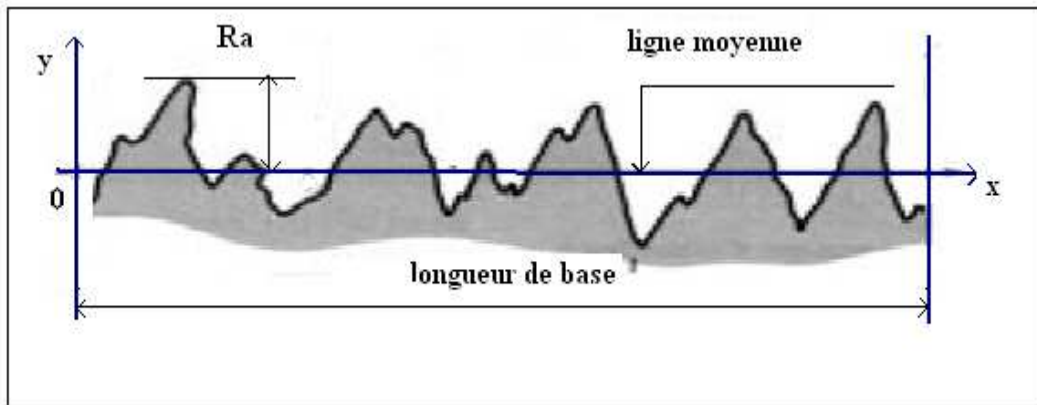


Fig. II.5. Ecart moyen arithmétique du profil

- Paramètre hybride: Sur le modèle TMK la classe de paramétriser d'état de surface caractérisant un critère dépendant à la fois de l'amplitude et de l'espacement, comme les pentes, les courbures,...

Ces paramètres permettent de connaître la forme moyenne des sommets, soit aigus, ou bien arrondis d'après la valeur moyenne de la courbure de la surface en ces points. [6]

D'après la norme NF EN ISO 4287 résume les différents paramètres d'état de surface existents ;

Paramètres d'ondulation	Paramètres de profil	Paramètres de rugosité
$W_a, W_z, W_{max}, W_t, W_{pc}, W_{sm}, W_q, W_p, W_v, W_{pm}, W_{sk}, W_{ku}, W_{dq}$	$P_a, P_z, P_{max}, P_t, P_{pc}, P_{sm}, P_{mv}, P_p, P_v, P_{pm}, P_{sk}, P_{ku}, P_q, P_{\xi c}, P_{mr}, P_{mr\mu m}, P_{dq}$	$R_a, R_z, R_{max}, R_t, R_q, R_{pc}, R_{sm}, R_{mr}, R_p, R_v, R_{pm}, R_{3z}, R_{z-ISO}, R_{sk}, R_{ku}, R_{\xi c}, R_{mr\%}, R_{mr\mu m}, R_{dq}$

IV.4. Procédure de calcul des paramètres de rugosité :

- Choisir une surface de référence
- Le choix de la ligne de référence
- Le signal de rugosité reposant sur la déviation de l'amplitude par rapport à cette surface de référence
- L'amplitude de la surface est enregistrée et discrétisée

- Utilisation de la méthode classique (méthode des moindres carrés) qui minimise le carré des résidus (signal de rugosité) entre la surface enregistrée et la surface de référence.

V. Spécification des états de surface :

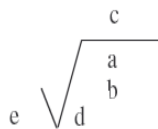
V.1. Indication sur les dessins de définition :

D'après la norme NF EN ISO 1302, l'analyse des fonctions telles que frottement, glissement, roulement, contrainte, étanchéité, aspect, doit permettre de satisfaire des caractéristiques géométriques telles que rugosité et ondulation d'une surface. [20]

Le symbole utilisé est un vé dissymétrique à 60° « \surd », dans le cas général, il ne préjuge d'aucun procédé de fabrication. S'il est nécessaire d'utiliser un moyen d'enlèvement de matière pour satisfaire l'état de surface spécifié, une barre horizontale est ajoutée « \surd » et si l'enlèvement de matière est interdit la barre est remplacée par un cercle « \circ ».

A ce symbole, on peut ajouter diverses spécifications, dans ce cas, une nouvelle barre horizontale s'ajoute à la grande branche vé « \surd ». [7]

Par exemple :



Tel que :

a : s'il y a une seule exigence d'état de surface, préciser sa valeur maximale en μm .

b : s'il y a plusieurs exigences d'état de surface indiquer

- la 1^{ère} exigence à la position 'a'

- la 2^{ème} à la position « b » et ainsi de suite

c : procédé de fabrication en toutes lettres (meulé, fraisé,...)

d : orientation des stries de surface

e : surépaisseur d'usinage sous forme numérique en mm

V.2. Méthode d'élaboration et mesure des caractéristiques d'états de surface:

Pour élaborer un état des surfaces d'une pièce mesurée, plusieurs méthodes sont appliquées depuis un temps et presque toutes ces procédures basées sur la connaissance de la forme d'un profil. Parmi ces méthodes, on cite : [5]

V.2.1 Méthode de la ligne moyenne:

Après avoir retiré la forme d'un profil total, on opère un filtrage du profil mesuré pour l'analyser. Le filtre génère une ligne moyenne d'où le nom de la méthode.

Plusieurs types de filtres sont normalisés :

- Filtres électriques de type RC, ils introduisent une déformation et un déphasage dans le signal.
- Filtres Gaussiens, issus des technologies numériques, ils évaluent les composantes de rugosité et d'ondulation en un seul filtrage sans introduire de déphasage. [20]

Remarque :

Certains appareils de mesure sont munis de patin qui sert à filtrer mécaniquement l'ondulation et certaines vibrations.

V.2.2 Méthode de la ligne enveloppée supérieure:

Cette méthode, mise au point en France par l'industrie automobile qui en généralise l'utilisation, est également dite méthode des motifs. On applique un algorithme de type « reconnaissance de forme sur le profil mesuré » pour évaluer les différents écarts géométriques.

Le système de la ligne moyenne n'est pas toujours adapté à la caractérisation de certaines surfaces, car ne prenant pas en compte leurs fonctionnalités. [9]

Pour avoir une approche fonctionnelle, il faut tenir compte des parties actives de la surface vers l'extérieur de la pièce.

V.2.3 Méthode de la courbe de portance:

D'après la norme NF EN ISO 13565-1-2-3, le taux de longueur portante est le rapport entre la somme des longueurs portantes du profil à une profondeur donnée et la longueur de l'évaluation. [9]

La courbe de portance décrit la variation du taux de longueur portante en fonction de l'augmentation de la profondeur du profil de rugosité.

Cette courbe est utilisée pour prévoir le terme à l'usure d'une pièce suivant trois critères.

Le critère de rodage ou les pics les plus saillants vont être usés et disparaître pendant les premières heures de fonctionnement (par exemple, dans un moteur, l'absence de ce critère limitera d'autant le temps de rodage de ce lui-ci)

Le critère de fonctionnement, qui représente la quantité de matière disponible à l'usure (plus cette quantité est disponible, le moteur fonctionnera longtemps) [2]

Le critère de lubrification qui détermine les creux disponibles et toujours utiles pour retenir un lubrifiant (l'absence ou la disparition de ces creux entraînent le grippage d'un moteur) [2]

Ces critères jouent un rôle qui permet de caractériser la micro géométrie des surfaces.

VI. Appareils de mesure :

Il est important de déterminer de manière de plus en plus finie l'état de surface d'un matériau ou la modification d'une telle surface. L'étude de ces surfaces se fait souvent à l'échelle micro ou nanoscopique. A l'heure actuelle, plusieurs méthodes peuvent mesurer des topographies par des moyens mécaniques, optique, ou par analyse d'image.[6]

Les écarts se obtiennent à l'aide de divers appareils de contrôle. Pour enregistrer les écarts de forme du 2^{ème} aux 5^{èmes} ordres, il y a plusieurs méthodes de contrôle qui ne fournissent pas de mesures chiffrée bien précises.

Heureusement des méthodes simples qui sont reliées aux méthodes de l'usinage sont développées pour donner une représentation (images) claire sur l'état d'une surface à traiter, à partir des méthodes traditionnelles (comparaison viso-tactile) aux méthodes de la fente

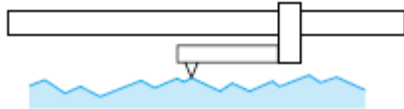
lumineuse avec un microscope jusqu'à les appareils de mesure optiques qui sont à haute technologie. [10]

On s'intéresse dans cette partie de parler sur les méthodes à palpeurs et optique

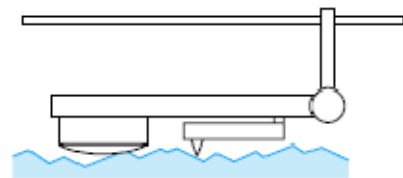
VI.1. Les palpeurs :

Il existe des appareils de mesure des surfaces dans plusieurs types de réalisation. La section transversale peut mesurer avec le procédé de la section parcourue par un palpeur.

Il y a plusieurs types de palpeurs tels que les palpeurs mécaniques, électroniques et optiques. [19]



« Palpeur mesurant les défauts de la pièce en référence à la translation de la machine »



« Palpeur différentiel mesurant localement les défauts de la pièce en référence au voisinage de la pièce »

« Fig. II.6 Quelques types des palpeurs »

Remarque :

Ces palpeurs sont en général des diamants taillés avec un rayon de courbure de l'extrémité de l'ordre de quelques micromètres. L'amplitude de leur mouvement est limitée à quelques dizaines ou centaines de micromètres, parfois quelques fractions de micromètre.

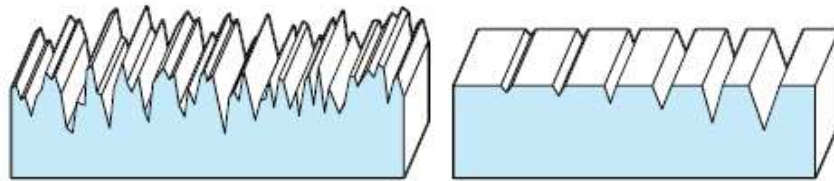
VI.1.1. Procédure :

Dans le procédé du palpage des sections, ou bien on palpe la surface avec une aiguille palpeuse pointue en la faisant glisser continuellement en longueur ou bien on palpe avec une aiguille mobile avançant par suites. L'aiguille palpeuse à une pointe en saphir ou on diamant avec un arrondi de 2 à 15 μ m, le déplacement de l'aiguille est fortement amplifié par des moyens mécanique, optique ou électrique est le déroulement du profil est indiqué sur une échelle ou sur un appareil enregistreur. [22]

VI.1.2. l'étalonnage des palpeurs :

L'étalonnage en générale dans le domaine métrologie est essentiel. Il existe plusieurs types d'étalons qui peuvent faire l'étalonnage dans des bonnes conditions, pour réduire les défauts d'amplitudes et de périodes.

La forme d'un étalon est déferont d'un étalon à l'autre qui dépend de leur utilisation, par exemple pour définir les défauts de fréquences spéciale ou utilise un étalon sinusoïdal...



« Fig. II.7. Etalonnage des rugosimètres »

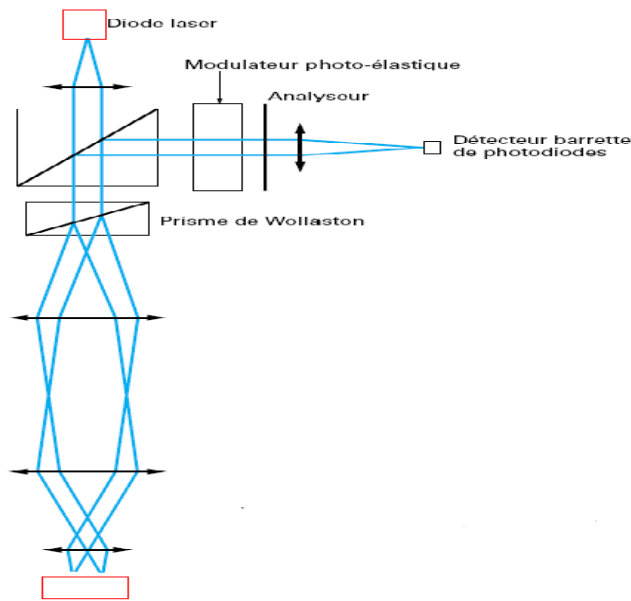
On peut étalonner par utilisation des étalons fondamentaux ou étalons secondaires, ainsi avec étalonnage par comparaison et par prélèvements. [15]

VI.2. Les appareils optiques :

Dans l'industrie et plus exactement dans le domaine de la mécanique de précision, les méthodes précédentes ne donnent pas des bons résultats pour des pièces complexes. Donc les mesures optiques prennent le relais.

VI.2.1. principe :

La méthode optique est basée sur une onde plane qui tombe sur une surface plane non totalement absorbante subite une réflexion et se propage sous forme d'une onde plane dans la direction donnée par les lois Descartes. Si les points voisins de la surface ne sont pas à la même hauteur, il résulte un déphasage local de l'onde plane qui se traduit à long terme par la lumière diffusée dans des directions autres que la direction de réflexion spéculaire. [19]



« Fig. II.8. Microscope interférentiel à polarisation pour l'étude de la rugosité »

L'avantage des mesures de diffusion est de donner directement la distribution des amplitudes en fonction de la fréquence spatiale des défauts.

L'inconvénient est que la mesure n'a de sens que si cette amplitude est faible devant la longueur d'onde (si la surface est très rugueuse la lumière est uniformément diffusée dans toutes les directions et ne représente plus la topographie de la surface) et la présence de la moindre poussière peut dénaturer les résultats. Ces mesures doivent donc être réservées à des états de surfaces de très bonne qualité et dans des conditions d'environnement exceptionnelles (flux laminaire, salle blanche...). [19]

VI.2.2. Palpeurs optiques différentiels :

Le principe de fonctionnement est basé sur jouer avec deux directions orthogonales de polarisation de l'onde électromagnétique, on peut faire d'une source lumineuse ponctuelle deux images juxtaposées. Il suffit d'inclure dans le schéma optique un dispositif qui ressemble au prisme de Wollaston. Les faisceaux réfléchissent les deux polarisations et donnent une information sur la différence de trajet optique entre les deux images voisines. Il s'agit encore d'un système de palpeur en deux points dont la fonction de transfert est limitée vers les basses fréquences spatiales par l'inverse de la distance des deux images, et vers les hautes fréquences spatiales par la largeur de chaque image. [23]

VI.2.3. Détermination de la rugosité par les microscopies :

Ils existent plusieurs types des microscopies plus développer (microscopes à effet tunnel électronique ou optique, le microscope à champ proche et les microscopes à force atomique...) pour définir la micro géométrie des surfaces solides plus complexes.

VI.2.3.1. microscopes à effet tunnel :

Le premier microscope à effet tunnel est électronique (pointe de tungstène dans des techniques de traitement physico-chimique donnent à la pointe un rayon de quelques 1/10 de nanomètres). [19]

• Procédure :

Pour déterminer les caractéristiques d'une surface il suffit d'approché l'instrument de celle-ci à une distance tel que le contact ne se fasse pas, pour cela les microscopes sont de dimensions petites (quelques centimètres), construits dans des matériaux très rigides, de plus il est indispensable, dans la plupart des cas d'utiliser un système d'amortissement pour isoler des vibrations extérieurs. [24]

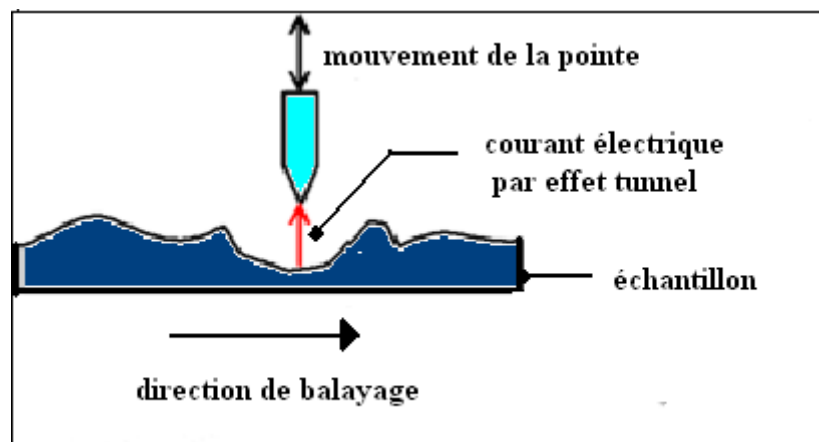


Fig. II. 9. Microscope à effet tunnel

Les variations de courant électrique collecte par la pointe peuvent donner une image électrique de la topographie de cette surface.

L'échantillon étudié est déplacé sur une très faible amplitude par un double balayage en 'x' et en 'y' effectué par des céramiques piézo-électriques.

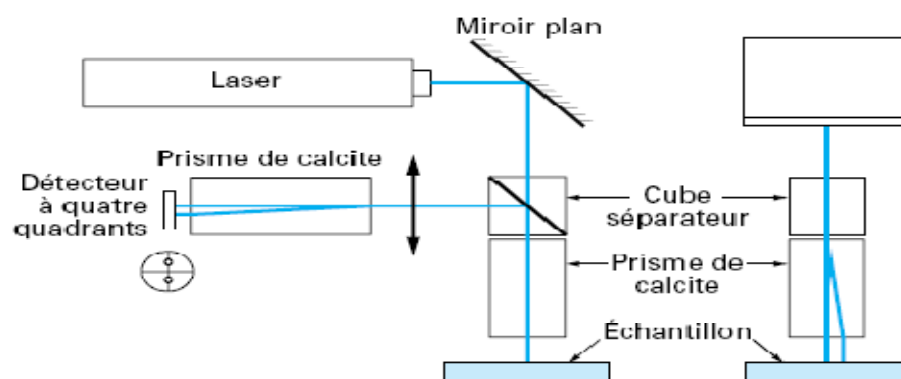
Pour ce type de microscopes, deux modes de fonctionnement existent, le premier représente les microscopes électroniques classiques, leur avantage est de travailler dans des conditions de température (298 K) et pression atmosphérique, mais pour des échantillons isolants tel que les forces de Vander Waals qui influent sur la variation des paramètres, microscope à force atomique (microscope à effet tunnel optique) le plus utilisé pour des raisons bien déterminées telle que la précision, réduire les vibrations d'un instrument de mesure....

VI.2.3.2. Microscope à balayage laser :

Ces instruments de mesure sont à mesurer et à contrôler des surfaces de formes complexes avec une fréquence de 3200 balayages par seconde, cette fréquence très élevée permet de faire des mesures d'objets très petits ou fragile dans des conditions de température élevées même si son mouvement est soumis à des vibrations.

• Principe de fonctionnement :

Un faisceau laser est émis par une diode laser. Ce faisceau est dirigé sur les facettes d'un miroir polygonal qui tourne à grande vitesse et qui est synchronisé par une horloge générant des impulsions. [19]



« Fig. II.10. Dispositif à laser pour contrôler la rectitude d'un miroir »

Le faisceau laser réfléchi balaie de haut en bas une lentille de collimation. S'il ne rencontre pas d'obstacle, le faisceau est focalisé par un condenseur. La tension de sortie de récepteur est proportionnelle à la quantité de lumière reçue par ce récepteur. Le nombre d'impulsions d'horloge complétées pendant l'obstruction du faisceau laser représente les points mesurés sur la surface d'une pièce à contrôler. [4]

VII. Conclusion :

1- La métrologie des états de surface utilisée depuis un siècle des moyens de mesure dit 'à contact', basés sur le déplacement d'un palpeur sur l'échantillon. Les moyens de mesure optique existent depuis les années 70 mais ont longtemps été négligés pour :

- Moins précis que les moyens mécaniques
- Peu fiables
- Non utilisables car non supportés par les normes internationales (ISO)

2- Les techniques optiques offrent désormais des avantages :

- L'absence de contact permet des vitesses de balayage plus rapides
- Les résolutions sont comparables aux moyens à contact
- Les temps de mesure sont beaucoup plus courts
- Il est possible de mesurer des matériaux fragiles, souples ou nus

Chapitre III :**CARACTERISTIQUES D'ETATS DE SURFACE
TRIDIMENSIONNELLE SANS CONTACT**

Une norme présente les différents moyens et méthodes peuvent être utilisés pour le mesurage des paramètres géométriques d'états de surface des produits. Les appareils optiques sont reconnus comme méthode d'exploration pour les stries, sillons, rugosité, arrachement... et les méthodes de franges (d'empreintes) projetées sont des méthodes de progression du profil sans contact, celles-ci sont utilisées au 2D, mais actuellement, il est plus intéressant de définir les caractéristiques d'états de surface d'une pièce sous sa forme réelle (3D), pour cela des recherches dans le domaine de contrôle métrologie 3D, pour gagner de temps et d'avoir assai d'information sur cette surface.

I. Représentation des éléments tolérances et de référence en 3D :

Les éléments tolérances et de références, sont au sens de la norme, des éléments géométriques réels. [19]

En métrologie 3D leur représentation se fait de trois façons :

- Par un ensemble fini de points mesurés, appartenant à la surface réelle
- Par un ensemble de point appartenant aux contours d'un élément géométrique idéal de substitution
- Par un ensemble de points construits

I.1 Ensemble de points mesurés sur une surface réelle :

Les points mesurés appartement à la surface réelle, ils seront bien repartis sur toute la surface ou sur la ligne décrite sur la surface. [16]

I.2 Eléments géométrique de substitution : est un élément géométrique réel, il est défini par ses paramètres de position, d'orientation et intrinsèque. Il est le plus souvent défini par l'élément géométrique des moindres carrés.[16]

I.3 Ensemble de points construits : est un ensemble de points obtenus par constructions géométriques, ils ne sont donc pas obtenus directement par mesure d'un élément. Ces ensembles de points construits sont utilisés pour définir de nouveaux éléments géométriques associés. [11]

II. L'intérêt de la caractérisation 3D des états de surface :

Notre monde perceptible est tridimensionnel. Par nature les objets, leurs dimensions, leurs surfaces, leur texture s'étendent dans les trois dimensions. De même, les interactions entre les objets (contacts, usure, glissement, etc.) se produisent dans l'espace à trois dimensions.

Il est donc logique de les analyser dans toutes ces dimensions, dans la mesure où la puissance des moyens de contrôle le permet.

Les propriétés des solides et leur comportement de pendent d'avantage des caractéristiques de leurs surfaces que de leurs propriétés massiques ou volumiques.

L'évolution rapide des techniques de fabrication telles que les machines à commande numérique a permis d'obtenir des surfaces relativement complexes, et exige la nécessité de contrôler ces pièces en forme réelle (trois dimensions) en emploi des instruments de contrôle tridimensionnels (machine de mesure tridimensionnelle, instruments de mesure optique,...)[17]

La mesure tridimensionnelle est actuellement la moyenne le plus fidèle pour caractériser une surface. Elle permet l'observation, l'identification et la quantification des irrégularités.

La mesure tridimensionnelle a pris une place importante dans les systèmes de production.

En effet la rentabilité économique de l'automatisation des moyens de production nécessite un contrôle rigoureux et automatique des spécifications géométriques des pièces produites.

Ces techniques peuvent a priori paraître plus intéressantes du fait qu'elles sont sans contact: elles offrent plus de rapidité et d'efficacité dans leur utilisation cependant leur précision est moindre et il arrive souvent que l'on n'ait pas un accès direct à l'objet, ce qui rend impossible leur utilisation. [10]

II.1. Définitions et éléments constituent la texture d'une surface :

II.1.1. Définitions :

Depuis plusieurs années, des travaux de recherche portant sur l'analyse, la segmentation et l'orientation de textures sont effectuées dans le groupe vision.

Intuitivement, la notion de texture nous paraît familière, mais en donner une définition précise devient plus complexe. Une texture est une information qui rend compte de l'état de surface d'un objet. Elle est caractérisée par l'arrangement plus ou moins régulier de motifs élémentaires. [2]

On distingue deux grandes classes de textures : la macro texture, qui sont constituées par la répartition spatiale d'un ou plusieurs motifs élémentaires nommés tex els, et le micro textures qui ont un aspect aléatoire mais pour lesquelles l'impression visuelle reste globalement homogène. Les textures donnent une information interne à une région. Dans des environnements flous ou perturbés, où l'information des contours n'est pas une donnée fiable, posséder une description de l'intérieur d'une région est un atout important. Les méthodes classiques d'analyse de textures sont très liées à la catégorie de textures.

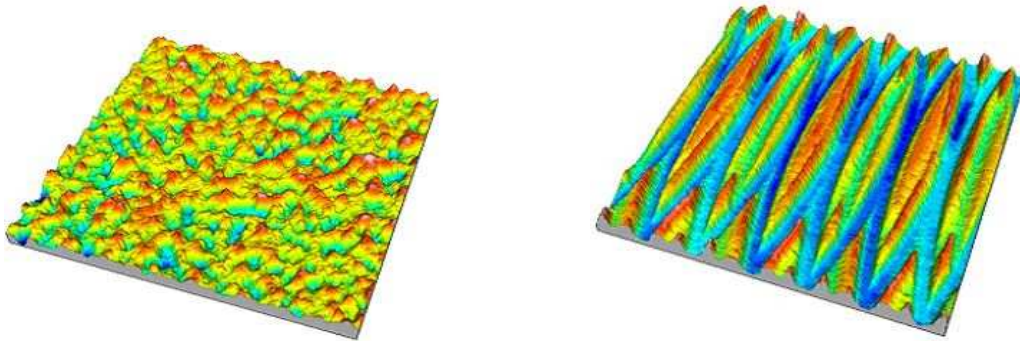
Pour la macro textures, on utilisera de préférence des méthodes structurales, tandis que l'analyse du micro textures se fera souvent par des méthodes de type statistiques.

II.1.2. Isotropie, Anisotropie

Lorsqu'on mesure un profil, en 2D, le capteur n'enregistre le relief que le long de son trajet. La mesure ne peut donc être représentative de la surface elle-même que sous certaines conditions, ces conditions dépendent de l'*isotropie* de la surface.

Une surface est dite *isotrope* lorsqu'elle présente des caractéristiques identiques quelle que soit la direction de mesure. C'est le cas, par exemple, des surfaces dont l'état de surface est aléatoire et ne présente aucune texture marquée.

Ce genre de surface est malheureusement assez rare et la plupart des surfaces rencontrées dans l'industrie présentent une texture orientée (surfaces tournées, pierrées, brossées, etc.) ou à structure périodique. On dit dans ce cas que la surface est *anisotrope*.



« surface présentant une texture isotrope »

« surface présentant une texture anisotrope (tournage double) »

«Fig. III.1 Représentation de la texture »

III. Les critères et paramètres de définition d'états de surface 3D :

III.1. Rugosité (moyenne, facteur d'asymétrie, hauteur, pente...):

Les premiers paramètres 3D à être apparus ont été basés sur les paramètres 2D existants, en extrapolant leur équation à deux dimensions. L'un des premiers travaux sérieux vers une standardisation a été conduit dans les années 90 par l'équipe du Pr. K. Stout à l'université de Birmingham, et a permis de définir un premier jeu de paramètres (les 14 de Birmingham).

En 2001, le projet européen SURFSTAND a étendu et amélioré les paramètres de Birmingham et a jeté les bases de la future norme ISO.

Les paramètres de la future norme ISO diffèrent parfois un peu de leur définition donnée lors des programmes européens, et certains paramètres n'ont pas été repris ou ont été remplacés par d'autres.

III.1.1. La norme ISO 25178 :

Première règle adoptée, celle qui définit l'appellation des nouveaux paramètres surfaciques. Ceux-ci commenceront par la lettre majuscule S (ou V pour certains paramètres fonctionnels). Contrairement à ce qui existe en 2D, les préfixes des paramètres 3D ne reflèteront plus les distinctions entre les composantes de rugosité, d'ondulation ou de structure. Vu la multiplicité des traitements et des filtrages qui sont désormais à la disposition des métrologues pour extraire l'information d'une surface, la séparation en trois composantes semble en effet obsolète.

Là où l'état de surface en 2D fait la différence entre Pa, Ra et Wa, le domaine du 3D n'emploiera donc que Sa, ce dernier sera un paramètre surfacique de rugosité, d'ondulation ou calculé sur la surface primaire, suivant le pré filtrage qui aura été effectué avant de calculer le paramètre.

Les paramètres d'amplitude, la plupart des formules mathématiques permettant de calculer les paramètres d'amplitude en 2D suivant l'ISO 4287 peuvent être facilement applicables à la mesure surfacique. C'est le cas par exemple de la rugosité moyenne quadratique du profil Rq, dont la formule contient une intégrale simple. En passant à l'intégrale double (sur une surface), on définit tout naturellement le paramètre Sq (rugosité moyenne quadratique de la surface). La même règle s'applique également pour les paramètres Sa (rugosité moyenne arithmétique), Ssk (facteur d'asymétrie), Sku (facteur d'aplatissement), Sp (hauteur maximale des pics) et Sv (profondeur maximale des creux). Seul le célèbre Rz (hauteur maximale du profil) pose problème, puisqu'il existe un paramètre Rz dit "des dix points" (défini dans la norme ISO 4287 de 1984) et une variante, définie (en 1997) comme étant la moyenne des hauteurs maximales de profil Rti calculées sur chaque longueur de base. Par souci de simplification, le Sz sera défini dans la future norme comme "la hauteur maximale du plus haut point à la plus profonde vallée", comme l'était jusqu'à présent défini le St. Ce dernier, devenu inutile, disparaît de la norme. [15]

Remarque :

Les formules pour les caractéristiques sont développées en III.2

III.1.2. Mesure de la rugosité :

La mesure de rugosité n'en finit pas de faire parler d'elle. Depuis plus de soixante ans, les normes se succèdent, tentant par de multiples paramètres et toutes sortes de formules mathématiques d'approcher au mieux ce qu'est la rugosité... Mais si l'on est parvenu depuis peu à harmoniser les définitions au niveau international, il y a encore du chemin à parcourir.

Certains paramètres utilisés pour définir la rugosité sont encore très controversés. D'autres semblent réservés à des applications spécifiques. D'autres enfin demeurent encore mal connus et sont sources de confusions... [20]

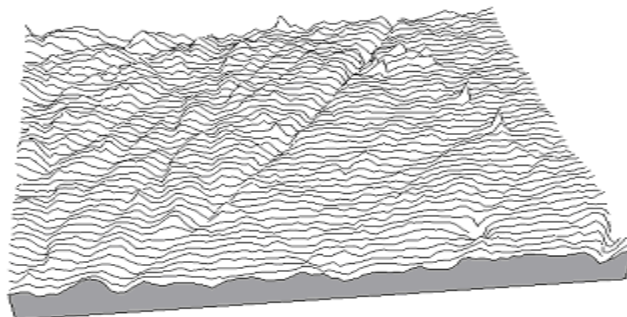
La rugosité est liée à une surface lisse est plus luisante, plus agréable au toucher...et à des critères fonctionnels : la rugosité d'une surface explique sa sensibilité à la corrosion, à l'usure, ainsi que ses propriétés d'adhérence, de glissement ou encore de roulement...

Mais lorsqu'on souhaite mesurer cette rugosité, l'affaire est autrement plus compliquée.

Principe:

Ce n'est que depuis une vingtaine d'années que les systèmes de topographie sont apparus.

Leur principe de fonctionnement consiste à mesurer des profils parallèles, espacés régulièrement, de façon à couvrir une surface rectangulaire. On obtient un relevé d'altitude z en fonction de la position x dans le profil, et la position y du profil dans la surface. C'est ce qu'on appelle un relevé 3D, et l'on parle de topographie 3D ou parfois de surfométrie.



« Fig. III.2. Représentation l'état de surface d'une pièce »

III.2. Les caractéristiques d'états de surface 3D :

Généralement les paramètres de l'amplitude sont sensibles à l'arrêt de longueurs l_x et l_y .

1. L'amplitude moyenne de la surface (rugosité moyenne) :

C'est un paramètre faisant la moyenne arithmétique, il est peu sensible aux changements de l'intervalle de prélèvement. Il est donné sous forme :

$$S_a = \frac{1}{l_x l_y} \iint_0^{l_x l_y} |z(x, y)| dx dy \dots \dots \dots 7$$

2. Rugosité moyenne quadratique de la surface :

C'est un paramètre faisant la moyenne statistique, comparaisant avec S_a , la rugosité moyenne quadratique est peu sensible aux changements de l'intervalle de prélèvement, mais elle est plus sensible au changement dans le secteur de prélèvement, ce paramètre est donné sous :

$$S_q = \sqrt{\frac{1}{l_x l_y} \iint_0^{l_x l_y} z(x, y)^2 dx dy} \dots \dots \dots 8$$

3. Hauteur de dix points de la surface, S_z est défini comme :

$$S_z = \frac{\sum_1^5 |z_i| + \sum_1^5 |z_j|}{5} \dots \dots \dots 9$$

Ce paramètre est basé sur la définition du sommet, la hauteur de dix points de la surface est un paramètre plus stable que les autres paramètres.

4. Facteur d'asymétrie de la surface :

Ce facteur est donné sous forme :

$$S_{sk} = \frac{1}{l_x l_y S_q^3} \iint_0^{l_x l_y} z(x, y)^3 dx dy \dots \dots \dots 10$$

Ce paramètre est une mesure de la forme de la distribution, pour les surfaces gaussiennes ce facteur est égal à 0.0, les surfaces négativement de travers ont de bonnes propriétés liquides de conservation et de roulement, alors que les autres surfaces tendent à avoir des projections qui pourraient porter au loin pendant le contact tribologique.[12]

5. Facteur d'aplatissement de la surface :

Ce paramètre est défini par :

$$S_{ku} = \frac{1}{l_x l_y S_q^4} \iint_0^{l_x l_y} z(x, y)^4 dx dy \dots\dots\dots 11$$

Ce facteur caractérise la rapidité de la hauteur de la distribution. La surface Gaussien à un facteur de 3.0, une surface avec une distribution étroite à un facteur plus grand que 3, les valeurs de ceci peuvent être aussi hautes que 100 et influencer disproportionnément par les isolés.

Une combinaison de ce facteur et le facteur d'asymétrie peut identifier des surfaces avec les sommets plats et les rainures profondes (porter des surfaces), c'est stable avec les changements dans l'intervalle de l'échantillonnage. [12]

6. Paramètres spéciaux :

6.1. Densité de sommets de la surface :

La densité est donnée sous forme :

$$S_{ds} = \frac{\text{nombre de sommets}}{(M-1)(N-1)\Delta x \Delta y} \dots\dots\dots 12$$

Tel que :

M : nombre total de ponts suivants (X)

N : nombre total de ponts suivants (Y)

Ce paramètre est basé sur la définition du sommet et est sensible à l'intervalle de l'échantillonnage.

6.2. Les concepts de fonction de l'auto corrélation et spectre du pouvoir :

Ces deux concepts sont basés sur la théorie du processus aléatoire. Un processus aléatoire est défini comme une combinaison d'un nombre infini de variables aléatoires :

- Si $z(x,y)$, est une variable aléatoire pour un $-\infty < x < +\infty$ particulier et $-\infty < y < +\infty$, alors la combinaison de tout telles variables est le processus aléatoire associé. Ce peut être complètement des caractéristiques par une fonction de densité de la probabilité connue.
- Si le processus aléatoire est non stationnaire, les auto corrélation fonctionnement et moyenne de l'ensemble et $z(x,y)$ est une réalisation d'un processus variant aléatoire, alors la moyenne de l'ensemble est équivalente à la moyenne est donné par : [12]

$$m_z = E[(z(x, y))] \dots\dots\dots 13$$

$$m_z = \lim_{\substack{l_x \rightarrow \infty \\ l_y \rightarrow \infty}} \frac{1}{4l_x l_y} \iint_{-l_x - l_y}^{l_x l_y} z(x, y) dx dy \dots\dots\dots 14$$

On a:

$$R(\tau_x, \tau_y) = E[z(x, y) - m_z][z(x + \tau_x y + \tau_y) - m_z] \dots\dots\dots 15$$

Et

$$m_z = \lim_{\substack{l_x \rightarrow \infty \\ l_y \rightarrow \infty}} \frac{1}{4l_x l_y} \iint_{-l_x - l_y}^{l_x l_y} [z(x, y) - m_z][z(x + \tau_x y + \tau_y - m_z)] dx dy \dots\dots\dots 16$$

La fonction régionale normale d'auto corrélation (the Normalized Areal Autocorrelation Functions AACF), sa valeur de mesure relié à la longueur de retard, pour les surfaces anisotropes leurs valeur est tend à 0.2, donc :

$$S_{al} = \min (\tau: R(\tau, \theta) \rightarrow 0.2) \dots\dots\dots 17$$

Où l'expression est donnée en coordonnée polaire.

6.3. Ratio de l'aspect de la texture de la surface :

$$0 < S_{tr} = \frac{S_{al}}{S_{sl}} \leq 1 \dots\dots\dots 18$$

Cette valeur varie entre 0 et 1, avec l'isotropie on peut avoir une valeur près de 1, dans la réalité, toute surface avec un ratio de l'aspect de la texture plus grand que 0.5 auraient l'uniformité multidirectionnel considérable.

6.4. Direction texture d'une surface S_{td} :

La direction de la texture de la surface est définie comme la direction de la mesure du y-axis ou x-direction. Un chemin efficace d'extraire la direction est détectée par le sommet maximal du spectre anguleux.

$$S_{td} = \begin{cases} -\beta, & \beta \leq \frac{\pi}{2} \\ \pi - \beta, & \frac{\pi}{2} < \beta \leq \pi \end{cases} \dots\dots\dots 19$$

Tel que :

β : est la position maximum de la valeur du spectre anguleux

- Ce paramètre est sans signification si le ratio S_{tr} de l'aspect de la texture, est plus grand :

$$S_{tr} > 0.5$$

- La direction, S_{td} de la texture est à une tangente à la courbure pour les surfaces des textures courbées.
- Pour d'autres surfaces on prend deux directions croisées qui pourraient être déterminées à partir du spectre angulaire.

7. Les paramètres hybrides :

Les paramètres hybrides sont sensibles à l'arrêt de la longueur d'onde court

7.1. Racine inclinaison du carré moyen de la surface :

$S_{\Delta q}$ exprime une moyenne de l'inclinaison de la surface à tous points, définis l'inclinaison ' ρ ' comme :

$$\rho(x, y) \Big|_{\substack{x = xi \\ y = yi}} = \rho_i \dots\dots\dots 20$$

Et

$$\rho_i = \sqrt{\left[\left(\frac{\partial z(x,y)}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial z(x,y)}{\partial y} \right)^2 \right]} \Big|_{\substack{x = xi \\ y = yi}} \dots\dots\dots 21$$

La racine pour l'inclinaison carrée moyenne est donnée par :

$$S_{\Delta q} = \sqrt{\frac{1}{l_x l_y} \iint_0^{l_x l_y} \rho(x, y)^2 dx dy} \dots\dots\dots 22$$

Ce paramètre est sensible à l'intervalle de l'échantillonnage, l'intervalle de la quantification et à la formule utilisée dans son calcul et donc a besoin d'être interprété avec soin.

8. Courbure de sommet moyenne arithmétique de la surface :

S_{sc} est défini par :

$$S_{sc} = \frac{1}{2n} \sum_{k=1}^n \left(\frac{\partial^2 z(x,y)}{\partial^2 x} \right) + \left(\frac{\partial^2 z(x,y)}{\partial^2 y} \right) \dots\dots\dots 23$$

Ce paramètre est basé sur la définition du sommet.

9. Le rapport dièdre de secteur S_{dr} :

Ce paramètre introduit, présente la notion d'une vraie superficie comparée au secteur projeté dans la vue de plan. Un petit secteur dièdre dA , peut être exprimée par :

$$dA = \sqrt{1 + \left(\frac{\partial z(x,y)}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial z(x,y)}{\partial y} \right)^2} dx dy \dots\dots\dots 24$$

Ou dans une notation discrète comme :

$$A_{ij} \approx \sqrt{1 + \left(\frac{z(x_{i+1}, y_j) - z(x_i, y_j)}{\Delta x} \right)^2 + \left(\frac{z(x_i, y_{j+1}) - z(x_i, y_j)}{\Delta y} \right)^2} \Delta x \Delta y \dots\dots\dots 25$$

Et

$$A = \iint_0^{l_x l_y} dA \approx \sum_{j=1}^{N-1} \sum_{i=1}^{M-1} A_{ij} \dots\dots\dots 26$$

Ce facteur peut être obtenu comme :

$$S_{dr} = \frac{\sum_{j=1}^{N-1} \sum_{i=1}^{M-1} A_{ij} (M-1)(N-1) \Delta x \Delta y}{(M-1)(N-1) \Delta x \Delta y} 100\% \dots\dots\dots 27$$

Ce paramètre donne une mesure d'importance d'amplitude et de qualités spéciales. Pour une surface plate ce facteur donne une valeur de zéro. Si les changements locaux de l'amplitude sont uniformément grands ce lui ci prend des valeurs plus grandes.

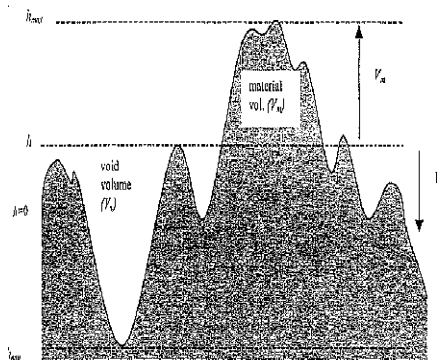
Ce facteur est très sensible aux changements de l'intervalle de prélèvement.

10. Paramètres utilitaires :

Ces paramètres fonctionnels sont calculés sur la courbe qui est normalisée. Ainsi ces facteurs sont basée sur un paramètre qui calculant le pourcentage du matériel aux vides (voir la figure), ce facteur est donné sous :

$$h = \frac{z(x,y)}{S_q} \dots\dots\dots 28$$

Si en référant sur cette figure en a :



« Fig.III.3.Diagramme du volume matériel pour une surface ou profil »

V_v fait référence du volume nul.

10.1. L'indice de la portée de la surface S_{bl} :

Ce paramètre est défini par :

$$S_{bl} = \frac{1}{h_{0.05}} \dots\dots\dots 29$$

Pour une surface Gaussien, l'indice de la portée de la surface peut être montré pour être approximativement 0.608, il a tendance à tomber dans la gamme de 0.3-2.0 pour une grande gamme de construction des bonnes surfaces (bon état de surface)

10.2. Le cœur d'indice :

L'indice liquide de conservation de noyau 'S_{ci}', peut être mesuré à partir de la quantité de fluide qui peut être maintenue après usage normal de rodage par exemple, ce facteur est défini comme :

$$S_{ci} = \frac{V_v(h_{0.05}) - V_v(h_{0.8})}{(M-1)(N-1)\Delta x \Delta y} / S_q \dots\dots\dots 30$$

Pour la surface Gaussian, S_{ci}=1.56

Pour d'autre surface :

$$0 < S_{ci} < 0.95 (h_{0.05} - h_{0.8}) \dots\dots\dots 31$$

10.3. L'indice liquide de conservation de vallée :

Ce paramètre 'S_{vi}' est une mesure de la quantité de lubrifiant, une surface peut maintenir même après que la plus mauvaise quantité de surfaces d'usage a conçu pour stocker des lubrifiants tendent à avoir une grande valeur pour cet indice du montant de lubrifiant.

Ce facteur est donné sous forme :

$$S_{vi} = \frac{V_v(h_{0.8})}{(M-1)(N-1)\Delta x \Delta y} / S_q \dots\dots\dots 32$$

Pour la surface Gaussian, S_{vi}=0.11

Les autres surfaces ont :

$$0 < S_{vi} < 0.2 * (h_{0.8} - h_{min}) \dots\dots\dots 33$$

Remarque :

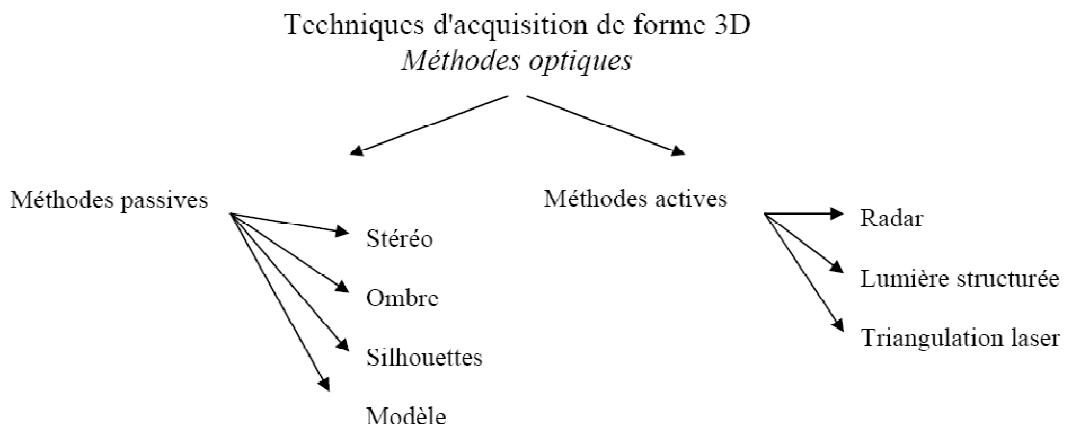
Ils y ont d'autres paramètres qui sont mal connus et d'après la norme ISO 25178, par ce que ces facteurs sont inutiles.

IV. La mesure 3D des états de surface sans contact :

Une pièce mécanique est un assemblage de surfaces élémentaires auxquelles on peut associer des éléments géométriques connus. La cinématique des machines-outils, ainsi que la cinématique des liaisons entre les pièces d'un mécanisme font que dans presque tous les cas, les éléments géométriques utilisés sont : le point, la droite, le plan, le cercle, la sphère, le cylindre et le cône. Dans les autres cas, les éléments géométriques utilisés peuvent toujours être définis par une succession de points et de normales en ces points. [14]

Identifier d'une pièce mécanique revient à associer à chaque surface fabriquée un élément géométrique connu, à définir les écarts de forme entre surface fabriquée et élément géométrique associé, à caractériser les paramètres de position des éléments géométriques entre-eux. Les appareils de mesure actuels utilisés en métrologie ne mesurent avec précision que des distances entre un point palpé et une référence de mesure ainsi une surface fabriquée ne peut être connue que par un ensemble de points palpés. Le choix du nombre de points et de leur répartition sur la surface fabriquée est directement lié à la connaissance que l'on désire obtenir de cette surface ; en général on effectue un compromis entre le temps de mesure, les dimensions de la surface, le défaut de forme, l'accessibilité des points de mesure liée à la cinématique de l'appareil de métrologie, et la précision du résultat désiré.[16]

IV.1 : Classification générale de la mesure 3D optique



D'autres techniques telles que l'interférométrie laser ou les techniques ultra-sonores, ne pas très utiliser à cause de leur difficulté de mise en œuvre ou de la faible part d'exploitation de leur signal dans le cadre de la métrologie 3D de pièces mécaniques.

IV.2. Les techniques de mesure tridimensionnelle :

Les données en trois dimensions représentent une quantité d'information importante et très intéressante dans de nombreux domaines. Donc il est intéressant d'étudier des techniques de mesure plus développées.

IV.2.1 Les techniques de mesure sans contact

Ces techniques sont à priori plus intéressantes, du fait qu'elles sont sans contact, elles offrent plus de rapidité et d'efficacité dans leur utilisation. Il arrive souvent que l'on n'ait pas un accès direct à l'objet, ce qui rend impossible l'utilisation de tels appareils.

Les techniques de mesure sans contact sont aujourd'hui employées dans le cadre de la reconstruction de surfaces où il s'agit à partir de la mesure d'un objet de reconstruire un modèle CAO. La précision reste ici secondaire et les données sont très souvent corrigées, par lissage, pour obtenir la définition géométrique nominale du modèle CAO. [17]

IV.2.1.1 Microscope :

Cette technique qui est très exigeante en temps, et peu efficace; de plus, elle n'est pas facilement automatisable.

En fait, il est possible de mesurer la hauteur d'un objet en effectuant une mise au point sur la surface visée. Par contre, cette technique ne concerne évidemment que les objets qui peuvent être visualisés par un microscope, donc de dimensions très faibles.

Cependant, il pourrait être possible d'imaginer un système analogue de la dimension d'un appareil photographique pour des applications à l'échelle humaine.[25]

IV.2.1.2 Interférométrie :

Cette technique sert principalement à mesurer des hauteurs de l'ordre du nanomètre, en utilisant des sources de laser cohérentes, et en analysant les figures d'interférences générées par la superposition des lasers.[25]

➤ Interférométrie de speckle :

Cette technique utilise les propriétés de cohérence des faisceaux laser et permet d'accéder à la mesure globale et sans contact, de micro-déplacements à la surface d'une pièce de manière très précise (résolution 0,1 μ m). L'enregistrement étant fait directement sur caméra CCD), les visualisations en temps réel, pendant l'application de la contrainte, sont possibles sur le moniteur vidéo. Les déformations mécaniques sont obtenues par le traitement d'image à partir de la carte des déplacements. Le tenseur des contraintes en tout point de la surface est alors déterminé à partir de la loi de comportement. [26]

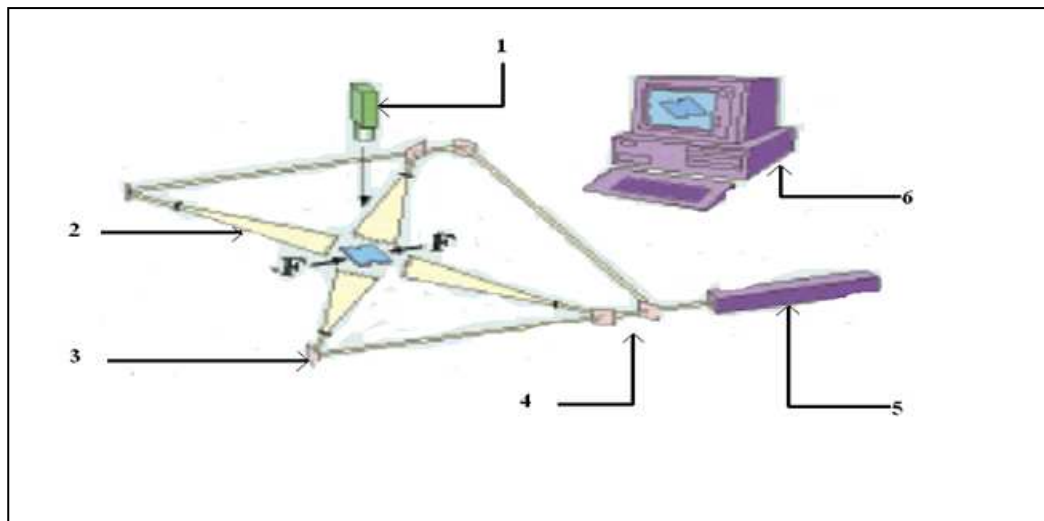


Fig. III.4. Principe d'interférométrie de speckle

- 1 : caméra vidéo
- 2 : lentille
- 3 : miroir
- 4 : lame séparatrice
- 5 : laser
- 6 : traitement informatique de l'image

IV.2.1.3 Technique de stéréovision :

Les techniques passives de stéréovision utilisent des contraintes entre deux ou plusieurs caméras pour calculer l'information de distance. La (fig.III.5) illustre le principe de la stéréovision. Tout point p d'une surface visible depuis les deux caméras se projette en p_1 sur le plan image P_1 et en p_2 sur le plan image P_2 . Les plans de coordonnées de l'image des deux caméras sont reliés par une transformation connue. L'identification des points dans les deux images qui correspondent au même point 3D dans la scène nous permet de calculer les coordonnées du point 3D. Les problèmes difficiles dans la vision stéréo sont la sélection de caractéristique identique dans les deux images est l'établissement des correspondances. [17]

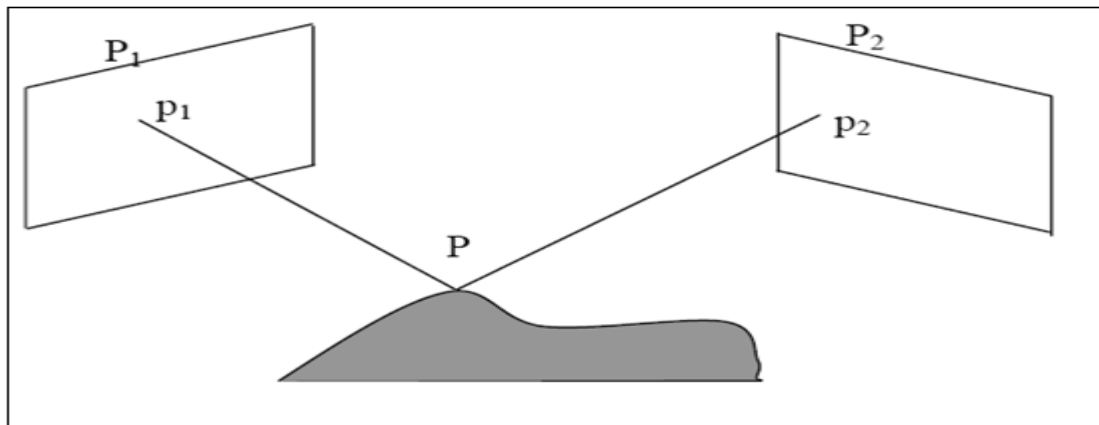


Fig.III.5. principe de stéréovision

IV.2.1.4 technique de triangularisation :

Le principe de la triangulation. Il projette un réseau de franges sur l'objet à mesurer et l'observe avec 2 caméras (Fig. 2). Les algorithmes de photogrammétrie permettent alors de calculer, pour chacun des pixels, les coordonnées 3D très précises de points.

Suivant la résolution des caméras, ce nuage de points peut contenir jusqu'à 4 millions valeurs.

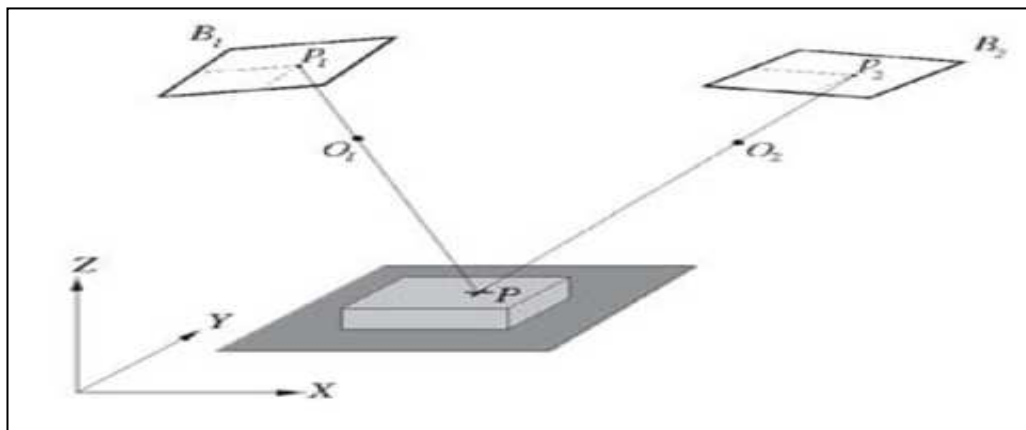


Fig. III.6. Projection de franges et triangulation

IV.2.2 Les techniques de mesure tridimensionnelles (MTAO) avec contact :

Le fait que ces techniques exigent un contact du système de mesure avec l'objet à mesure constitue leur caractéristique commune.

Un exemple de ces systèmes est un bras mobile ou (MMT) qui possède un capteur de contact à son extrémité, ce bras peut se déplacer où il veut sur l'objet, et dès qu'il touche un point de cet objet, il déduit ses coordonnées tridimensionnelles à partir de la position du bras (palpeur). [25]

Ce dernier peut être commandé soit manuellement, soit automatiquement. Les techniques de mesure tridimensionnelles avec contact présentent des performances pouvant satisfaire les exigences du bureau d'étude; leur limitation résidant essentiellement dans le temps de mesures relativement longues et aussi elles exigent par exemple d'avoir des objets solides et peu fragiles. [16]

IV.3 machine de mesure tridimensionnelle :

IV.3.1 Caractéristiques de la Machine de Mesure Tridimensionnel (MMT) :

Constructeur : RENAULT AUTOMATION

Type : 13 08 08

N° de série : 7338

N° d'identification : B 45 001

Espace de travail de cette MMT et : X=1300 mm, Y=800 mm, Z=800 mm Résolution = 0.1 μ :



«Fig. III.7.Représentation de la MMT Renault Automation »

Un capteur est installé sur l'axe Z de la M.M.T par l'intermédiaire d'une tête motorisée PH10 (Renishaw). Le dispositif de mesure comprend alors cinq degrés de liberté, respectivement trois translations (suivant les axes X, Y et Z) et deux rotations (autour des axes A et B).

IV.3.2. Calibrage du capteur :

La phase de calibrage généralement mise en œuvre permet de déterminer les paramètres géométriques globaux nécessaires au calcul de la triangulation laser. Le modèle communément utilisé est linéaire et basé sur le modèle du sténopé.

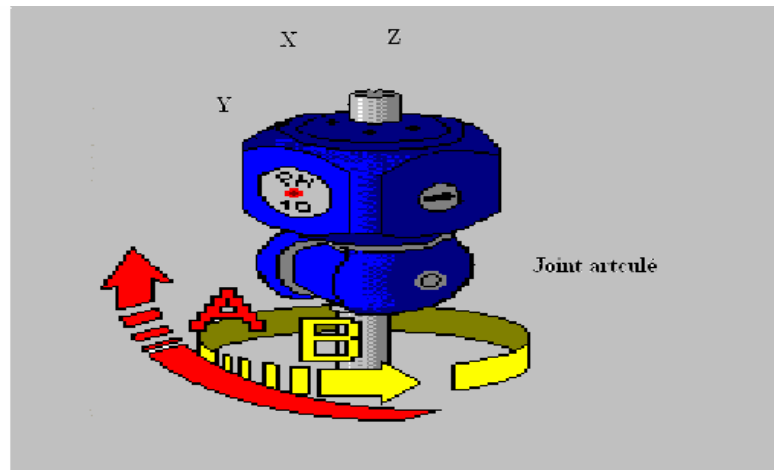
Ce modèle généralement utilisé par les constructeurs de matériel est restreint et ne prend pas en compte les défauts de montage de l'optique qui provoquent des distorsions sur le capteur C.C.D, ou encore les défauts du plan laser qui présente généralement une courbure. D'autre part, les modèles paramétriques de correction ne prennent pas forcément en compte les défauts locaux. L'utilisation d'un modèle non paramétrique peut s'avérer plus précis et plus facile à mettre en œuvre. [17]

Le problème du calibrage reste toutefois délicat et fait appel à des modèles complexes qu'il est souvent difficile d'identifier.

Le capteur Metris Lc 50 est adapté sur la MMT par l'intermédiaire d'une tête motorisée à 2 axes (Renishaw ® PH10) de façon à avoir 720 orientations différentes de mesure. Pour s'assurer que tous les points soient mesurés par le capteur dans un même référentiel (liés à la MMT), il est nécessaire de faire le calibrage externe (appelé ici qualification de la direction).

Il faut calculer la matrice de passage entre l'espace de la MMT et celui du capteur. Cette opération de calibrage externe pour une orientation donnée consiste à mesurer une sphère référence de rayon connu dans l'espace de travail au milieu et dans quatre zones du champ de vue, pour chaque zone, on mesure une ligne de la sphère en différentes positions. [13]

La mesure d'une pièce nécessite généralement plusieurs orientations du capteur notre capteur a 5 degrés de liberté : 3 translation et 2 rotations A et B : A autour d'un axe horizontal variable dans la plan des axes X et Y et B autour l'axe Z.



« Fig. III.8.Liaison articulés et motorisée avec deux angles (A et B) de rotation »

Chaque position de mesure doit au préalable faire l'objet d'une procédure d'alignement appelée encore qualification, elle représente en fait l'étape de calibrage extrinsèque du capteur ou encore le référencement du capteur par rapport aux axes de la M.M.T. Cette procédure, automatique, consiste à numériser une sphère étalon géométrique et optique. [17]



$A=0^\circ$ et $B=0^\circ$



$A = 22.5^\circ$ et $B=0^\circ$



$A = 45^\circ$ et $B=0^\circ$

« Fig. III.9.Visualisation de quelques positions de qualification du capteur »

IV.3.3 Principe de numérisation :

Comme le montre la figure III.10, la numérisation à l'aide d'un capteur à nappe laser 3D consiste à déplacer le plan de scanning (XZ) ou (YZ) suivant une direction hors plan c'est-à-dire ayant une composante suivant la direction perpendiculaire (Y) ou (X). Dans le plan de scanning se trouve une fenêtre appelée champ de vue, elle est située à une distance du capteur de 100 mm environ, et est définie par une largeur et une profondeur de champ. En position fixe, le laser balaye la surface de la pièce et génère une ligne donnant l'intersection du plan de scanning avec la surface. Seule la portion de ligne située à l'intérieur du champ de vue (constituée d'environ 720 points) correspond à des points considérés comme valides et effectivement enregistrés par le système.

Le déplacement du capteur suivant l'axe Y donne alors un nuage de points (succession de lignes) correspondant à la surface mesurée. On notera que le déplacement peut aussi s'effectuer simultanément suivant les 3 axes.

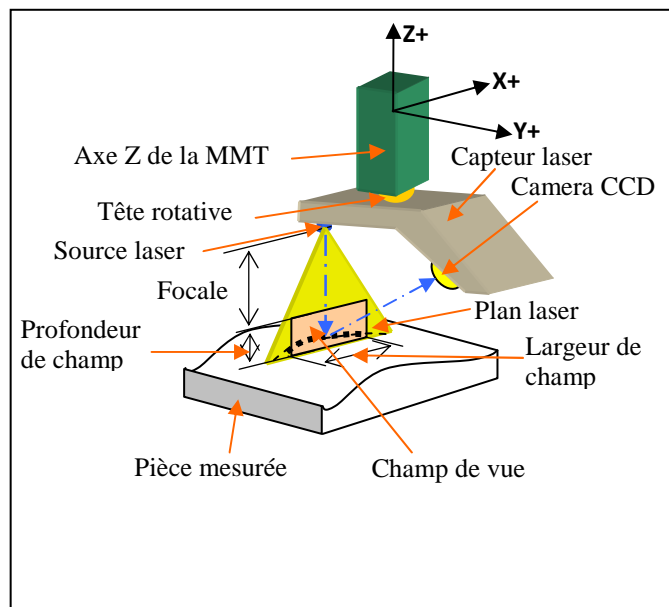


fig.III.10. Schéma de principe du capteur laser sans contact à nappe plane

IV.3.4 Sources des erreurs lors du mesurage des surfaces :

En mesurage 3D sans contact par la MMT, les erreurs de mesure peuvent provenir de différentes sources. On peut citer:

1. Erreurs dues au capteur (caractéristiques métrologique)
2. Erreurs dues à la position du capteur par rapport à la pièce mesurée
3. Erreurs liées à la machine (MMT)
4. Erreurs liées au système de traitement
5. Erreurs dues au changement de la réflectivité de surface
6. Erreurs dues aux surfaces réfléchissantes
7. Erreurs dues aux surfaces avec des discontinuités
8. Erreurs dues au faisceau partiellement occulté
9. Erreurs dues à la granularité de laser ou speckle

Lors d'un mesurage, les différentes sources d'erreurs agissent d'une façon plus ou moins importante sur l'incertitude de mesure. Certaines peuvent être considérées comme ayant des effets négligeables, telles que les erreurs liées à la machine (guidages supposés parfaits et axes associés orthogonaux), au système de traitement, et au capteur laser. D'autres erreurs peuvent être réduites telles que celles dues aux problèmes physiques (rugosité, réflectivité). La position du capteur par rapport à la pièce agit également sur les erreurs de mesure et peut être une source d'erreurs importantes. [14]

IV.3.5 Système de traitement des mesures:

Le résultat de la mesure 3D sans contact par MMT qui permet de numériser la pièce à mesurer, c'est à dire, convertir la pièce à mesurer en un nuage de points, est un nuage de points donnés sous forme d'un fichier numérique. Le traitement des nuages de points correspondant à la pièce consiste à :

- découper le nuage initial en nuage élémentaire correspondant à des surfaces simples, en évitant les bords.
- reconstruire une surface passante par les points du nuage élémentaire sélectionné.

- éliminer les points aberrants (séparation des points)
- Recherche les surfaces optimisées et calculer les erreurs, ainsi les caractéristiques d'états de surfaces 3D.

IV.3.5.1 Utilisation des logiciels:

Le développement rapide qu'a connu la machine à mesurer est dû en grande partie au caractère évolutif de l'informatique et des logiciels de mesure. Ceux-ci sont spécifiques à chaque constructeur et permettent en général de définir par construction des éléments géométriques tels que : point, droite, plan, cercle, cylindre, sphère et cône.

Des relations géométriques sont introduites pour définir par exemple l'intersection et la distance entre les éléments, l'angle entre les droites, les plans ou axes, la projection d'un point sur un plan, etc. Les éléments géométriques palpés sont calculés suivant un programme d'optimisation dont les performances sont d'autant meilleures que le nombre de points palpés est grand, d'où la possibilité de définir le défaut de forme. [13]

En plus du logiciel de base, certains constructeurs proposent des logiciels spécifiques de traitement tels que mesure de carrosserie, mesure des engrenages, mesure de courbes inconnues, calculs statistiques, etc.

Les systèmes actifs de la vision 3-D, fournissent leur propre illumination et sont donc soumis à moins de bruits. On distingue trois techniques principales employées en métrologie :

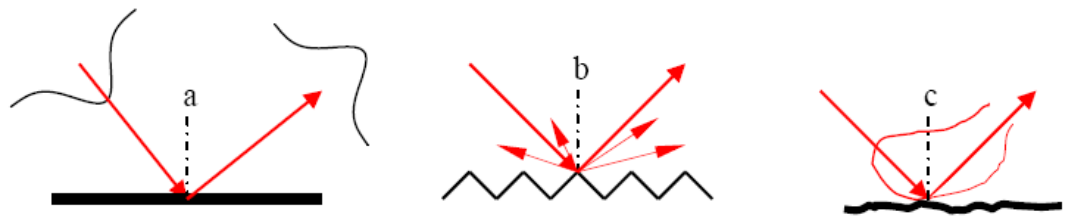
- la technique de mesure de temps de vol (pour la mesure de grandes pièces),
- la projection de lumière structurée,
- la triangulation laser.

Triangulation laser Lumière structurée Techniques d'acquisition de forme 3D
Méthodes optiques Méthodes actives Radar Silhouettes Méthodes passives Stéréo Ombre

IV.3.6 Influence de la direction de la lumière sur un nuage capté :

Les caractéristiques (intensité, taille, ...) du rayon laser réfléchi sur le CCD par la surface mesurée présentent un effet notable sur l'incertitude de mesure. Ces caractéristiques sont liées fortement à la micro-géométrie de la surface mesurée (état de la surface). La dispersion du rayon réfléchi, due à l'état de surface mesurée, déforme l'image du spot laser sur le CCD. [17]

En milieu homogène, la lumière se propage en ligne droite (principe de Fermat). Si le milieu est à gradient d'indice, il y a déviation continue du faisceau lumineux et l'énergie se trouve concentrée selon une courbe gauche dans l'espace. Par contre, en milieu inhomogène ou aléatoire, il y a une perte d'énergie dans toutes les directions: c'est la diffusion de volume.



« Réflexion spéculaire par un dioptre plan idéal (a), diffraction par un Profil périodique (b) et diffusion par une surface aléatoire (c). »

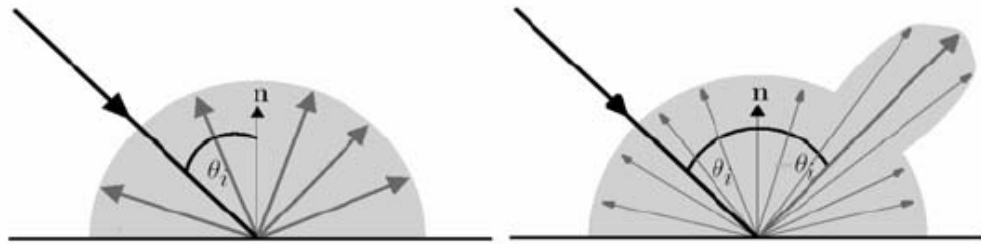
« Fig.III.11. Les directions de la lumière »

Si le dioptre est idéalement plan, le faisceau réfléchi est une gaussienne pondérée par le spectre du coefficient de réflexion de l'échantillon (Figure-a). Les directions moyennes incidentes et réfléchies de ce faisceau sont données par les lois de Descartes ($\sin i = n \sin r$). Par contre, si le dioptre est une surface périodique de pas P plus grand que la longueur d'onde λ d'éclairement (ici rayon laser), on assiste à une discrétisation du faisceau réfléchi (Figure-b) : l'énergie lumineuse est concentrée selon quelques directions particulières appelées ordres de diffraction. Ces directions sont données par la loi des réseaux. Enfin, si le dioptre présente des fluctuations de hauteur aléatoire, l'énergie est réémise selon une répartition spatiale continue dans tout l'espace, appelée indicatrice de diffusion (Figure-c).

On remarquera que cette diffusion de surface s'apparente ainsi à la diffraction par un profil aléatoire. En effet, pour un réseau, le profil périodique se décompose en une suite discrète de sinusoïdes (séries de Fourier) qui conduisent chacune à un ordre de diffraction particulier.

Pour une surface aléatoire, le profil se décompose en une suite continue de sinusoïdes (intégrale de Fourier); il y a une infinité d'ordres de diffraction qui constituent alors l'indicatrice de diffusion. Ce phénomène provoque donc un bruit qui augmente les incertitudes de mesure.

Le cas idéal pour l'utilisation du capteur nappe laser correspond à des surfaces qualifiées de Lambertiennes si les rayons lumineux sont réfléchis avec une même intensité dans toutes les directions du demi espace, comme l'indique cette figure.[17]



« Fig.III.12.Réflexion uniforme ou Lambertienne (à gauche, réflexion spéculaire (à droite) »

IV.4 Récapitulatif de la procédure de mesure sans contact :

La mise en œuvre de la technique de mesure 3D sans contact dans le contrôle des pièces mécaniques consiste à :

1. Analyser le dessin de définition et étudier la faisabilité de mesure de la pièce par la MMT sans contact
2. Choisir les surfaces à mesurer
3. Positionner la pièce sur le marbre de la MMT
4. Calibrer le capteur, définir le champ de vue
5. Définir la configuration optimale de la position du capteur par rapport à la pièce sur la base de l'incertitude minimale.

6. Si nécessaire, refaire l'opération de mesure au moins cinq fois
7. Récupérer les fichiers numériques correspondant à la pièce mesurée
8. Traiter le nuage de points obtenus

IV.5 Avantages et inconvénients de la procédure sans contact :

1. le nombre de points mesurés est important et permet donc d'avoir une information plus riche, notamment en termes de défauts de forme.
2. réduction importante du temps de mesure.
3. automatisation des tâches en inspection.
4. c'est une méthode sans contact, donc, on peut l'utiliser pour des pièces de matériaux déformables.
5. utilisation exigeante pour les pièces de formes gauches et complexes.
6. Cependant, la précision globale de mesure de cette méthode n'atteint pas celles des mesures par palpage.
7. utilisation limitée uniquement à la mesure des surfaces que les rayons lumineux peuvent toucher ; les surfaces cachées sont impossibles à mesurer puisque la lumière se déplaçant en ligne droite.

V. Conclusion :

Le besoin de contrôler avec précision les différentes pièces mécaniques notamment les défauts de forme par rapport aux éléments de référence, demande la mise en place de dispositifs de mesure assurant des déplacements contrôlables dans l'espace. D'autre part, l'évolution des techniques de fabrication a permis d'obtenir des surfaces relativement complexes. L'utilisation des appareils de mesure monodimensionnels tels que le micromètre, le comparateur, la colonne de mesure, ou bidimensionnelles tel que le microscope optique devient inadaptée ou nécessite l'emploi d'accessoires onéreux et coûteux.

Donc, il est nécessaire d'employer d'autres techniques de mesure capables de faire des mesures tridimensionnelles comme les mesures sur la MMT.

Chapitre IV :

APPLICATION SUR DES PIÈCES INDUSTRIELLES

I. But :

Notre but est d'étude et avoir à la fin les valeurs de quelques caractéristiques d'états de surface 3D pour les cinq pièces qui sont de forme différente et du matériau différent.

Avant d'entamer notre partie il faut définir quelques termes métrologies :

II. Termes métrologies généraux :

Les définitions des termes métrologiques données dans ce mémoire proviennent du vocabulaire international des termes généraux et fondamentaux de métrologie (en abrégé VIM), [17].

• Grandeur :

Attribut d'un phénomène, d'un corps ou d'une substance, qui est susceptible d'être distingué qualitativement et déterminer quantitativement, le terme grandeur peut se rapporter à une grandeur dans un sens général [exemple a] ou à une grandeur particulière.

Exemples :

- 1) grandeur dans un sens général : longueur, temps, masse, température, résistance électrique, concentration en quantité de matière ;
- 2) grandeurs particulières
 - Longueur d'une tige donnée
 - Résistance électrique d'un échantillon donnée de fil

• Valeur d'une grandeur :

Expression quantitative d'une grandeur particulière, généralement sous la forme d'une unité de mesure multipliée par un nombre.

- **Valeur vraie d'une grandeur :**

Valeur compatible avec la définition d'une grandeur particulière donnée.

- **Valeur conventionnellement vraie d'une grandeur :**

Valeur attribuée à une grandeur particulière et reconnue, parfois par convention, comme la représentante avec une incertitude appropriée pour un usage donné.

- **Mesurage :**

Ensemble d'opération ayant pour but de déterminer une valeur d'une grandeur.

- **Principe de mesure :**

Base scientifique d'un mesurage, par exemple, effet Doppler utilisé pour le mesurage de la vitesse.

- **Méthode de mesure :**

Succession logique des opérations, décrites d'une manière générique, mises en œuvre lors de l'exécution de mesurages.

- **Mode opératoire de mesure :**

Ensemble des opérations décrites d'une manière spécifique, mises en œuvre lors de l'exécution de mesurages particuliers selon une méthode donnée.

- **Mesurande :**

Grandeur particulière soumise à mesurage.

- **Grandeur d'influence :**

Grandeur qui n'est pas le mesurande mais qui a un effet sur le résultat du mesurage.

- **Résultat d'un mesurage :**

Valeur attribuée à un mesurande, obtenue par mesurage.

- **Résultat brut :**

Résultat d'un mesurage avant correction de l'erreur systématique.

- **Résultat corrigé :**

Résultat d'un mesurage après correction de l'erreur systématique.

- **Exactitude de mesure :**

Étroitesse de l'accord entre le résultat d'un mesurage et une valeur vraie du mesurande.

- **Répétabilité des résultats de mesure :**

Étroitesse de l'accord entre les résultats des mesurages successifs du même mesurande, mesurages effectués dans la totalité dans les mêmes conditions de mesure.

- **Reproductibilité des résultats de mesure :**

Étroitesse de l'accord entre les résultats des mesurages du même mesurande, mesurages effectués en faisant varier les conditions de mesure.

III. Mesurage et interprétations des résultats :

III.1 Mesurage :

L'objectif d'un mesurage est de déterminer la valeur d'un mesurande, c'est-à-dire la valeur de la grandeur particulière. En conséquence, un mesurage commence par une définition du mesurande et de la méthode de mesure....

Dans le but de déterminer les caractéristiques d'états de surface pour des pièces industrielles en 3D, de forme plane, cylindrique et sphérique pour différents matériaux, ils ont réalisés quelques essais de mesure, ces essais ont été effectués au laboratoire de Electronique, Informatique et Image (LEII), Université de Bourgogne, France.

III.1.1 Les conditions de mesure :

Les essais de mesures sont effectués dans les conditions suivantes :

- Température : $T = 298 \text{ K}$
- Pressions atmosphérique : $P = 1,013 \text{ bar}$
- Humidité : 59%

III.1.2 Matériel utilisé :

Durant tous les essais, le matériel utilisé se compose de :

- Capteur laser type : LC 50
- Machine à mesuré tridimensionnelle sans contact
- Micro ordinateur type PC, 496.66 Mhz RAR 16Mo ; DD370 Mo.
- Trois camera fixées dans trois coins dans le laboratoire.

III.1.3 Mesurages :

Les relevés des points sont effectuées sur cinq pièces de forme plane de deux différents matériaux, la première en bois (brut) et la deuxième en aluminium (lisse), les deux autres pièces sont de forme cylindrique (l'une brut et l'autre en aluminium) et la dernière celle de la forme sphérique en aluminium.

Avant de calculer les caractéristiques on fait une optimisation pour aboutir à des bons résultats des écarts.

III.1.4 Optimisation :

- Optimisation d'un plan :

L'équation d'un plan peut s'écrire sous la forme suivante :

$$Ax + By + Cz + D = 0 \dots\dots\dots 34$$

En supposant $C \neq 0$ (plan non parallèle à xoy), on peut alors écrire :

$$z = ax + by + c \dots\dots\dots 35$$

Pour un point $M_i (x_i, y_i, z_i)$ n'appartenant pas à ce plan, on aura :

$$z_i = ax_i + by_i + c + \varepsilon_i \dots\dots\dots 36$$

d'où :

$$\varepsilon_i = z_i - (ax_i + by_i + c) \dots\dots\dots 37$$

Soit la fonction :

$$W = \sum_{i=1}^n \varepsilon_i^2 \dots\dots\dots 38$$

On détermine les coefficients a, b et c en minimisant la fonction W suivant la méthode des moindres carrés; c'est à dire :

$$\frac{\partial W}{\partial a} = \frac{\partial W}{\partial b} = \frac{\partial W}{\partial c} = 0 \dots\dots\dots 39$$

Remarque :

Les coefficients a et b correspondent aux inclinaisons du plan optimal dans les plans de projections xOy et yOz. Ce qui se traduit par les relations :

$$a = \text{tg}\alpha \quad \text{et} \quad b = \text{tg}\beta$$

L'intersection du plan optimal avec l'axe z est la cote c

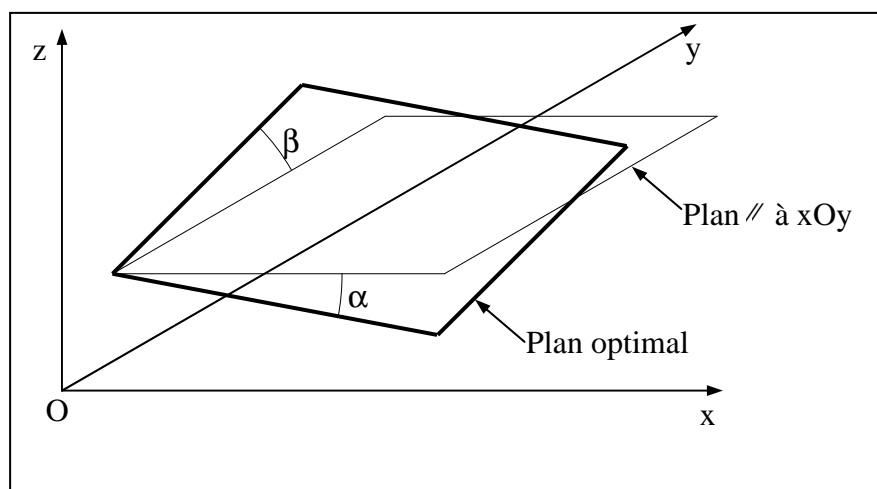


Fig. IV.1. Représentation le plan optimal

La détermination des coefficients a, b et c est obtenue en résolvant le système d'équations.

On a

$$W = \sum_{i=1}^n \epsilon_i^2 = \sum_{i=1}^n [z_i - (ax_i + by_i + c)]^2 \dots\dots\dots 40$$

$$\frac{\partial W}{\partial a} = 0 \dots\dots\dots 41$$

$$\sum_{i=1}^n \{-2x_i [z_i - (ax_i + by_i + c)]\} = 0 \dots\dots\dots 42$$

$$-\sum_{i=1}^n x_i z_i + a \sum_{i=1}^n x_i^2 + b \sum_{i=1}^n x_i y_i + c \sum_{i=1}^n x_i = 0 \dots\dots\dots 43$$

D'où :

$$a \sum_{i=1}^n x_i^2 + b \sum_{i=1}^n x_i y_i + c \sum_{i=1}^n x_i = \sum_{i=1}^n x_i z_i \dots\dots\dots 44$$

$$\frac{\partial W}{\partial b} = 0 \Rightarrow \sum_{i=1}^n \{-2y_i [z_i - (ax_i + by_i + c)]\} = 0 \dots\dots\dots 45$$

$$-\sum_{i=1}^n y_i z_i + a \sum_{i=1}^n x_i y_i + b \sum_{i=1}^n y_i^2 + c \sum_{i=1}^n y_i = 0 \dots\dots\dots 46$$

Alors :

$$a \sum_{i=1}^n x_i y_i + b \sum_{i=1}^n y_i^2 + c \sum_{i=1}^n y_i = \sum_{i=1}^n y_i z_i \dots\dots\dots 47$$

$$\frac{\partial W}{\partial c} = 0 \dots\dots\dots 48$$

$$\sum_{i=1}^n \{-2[z_i - (ax_i + by_i + c)]\} = 0 \dots\dots\dots 49$$

$$-\sum_{i=1}^n z_i + a \sum_{i=1}^n x_i + b \sum_{i=1}^n y_i + nc = 0 \dots\dots\dots 50$$

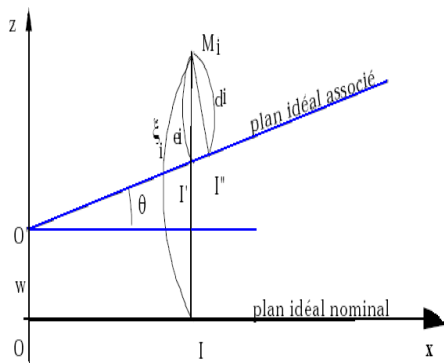
Donc :

$$a \sum_{i=1}^n x_i + b \sum_{i=1}^n y_i + nc = \sum_{i=1}^n z_i \dots\dots\dots 51$$

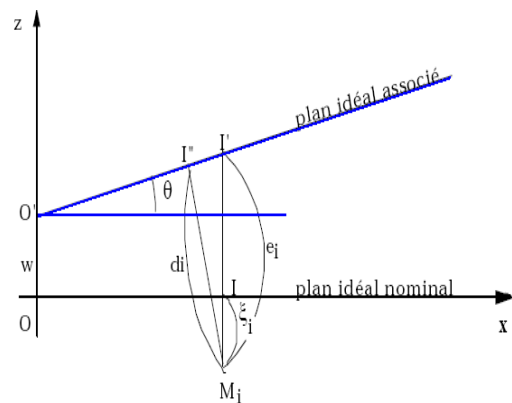
Sous forme matricielle, on peut écrire :

$$\begin{pmatrix} \sum x_i^2 & \sum x_i y_i & \sum x_i \\ \sum x_i y_i & \sum y_i^2 & \sum y_i \\ \sum x_i & \sum y_i & n \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a \\ b \\ c \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sum x_i z_i \\ \sum y_i z_i \\ \sum z_i \end{pmatrix} \dots\dots\dots 52$$

Calcul de la distance orthogonal d'un point par rapport à ce plan :



« position positive »



« position négative »

« Fig. IV.2.la distance orthogonal d'un point par rapport à un plan optimal »

Après calcul les coefficients :

L'équation du plan sous forme :

$$ax + by - z + c = 0 \dots\dots\dots 53$$

Avec ξ_i écart mesuré $M_i I$

Tel que :

$$e_i = \xi_i - w - OI.\theta \dots\dots\dots 54$$

Et

d_i : la distance vraie au plan idéal optimisé $M_i I$

La distance d_i dans tous les cas de figure est donnée par:

$$d_i = \left| \frac{ax_i + by_i - z_i}{\sqrt{a^2 + b^2 + 1}} \right| \dots\dots\dots 55$$

Cette différence est toujours négative, et par suite les écarts e_i , surestiment les distances vraies.

On peut considérer cette erreur est dans tous les cas, négligeable : en effet une rotation de 2.5° correspond déjà à un défaut de 1mm sur une longueur de 23 mm, défaut jamais atteint dans le cas de pièces mécaniques.

➤ optimisation d'un cylindre :

Dans la référence [**Pierre BOURDET**], on trouve la méthode d'optimisation d'un cylindre. Ce qui suit résume cette méthode.

On définit pour le cylindre théorique :

- (u , v) : la position de son l'axe
- α et β : les inclinaisons de son axe
- R : son rayon

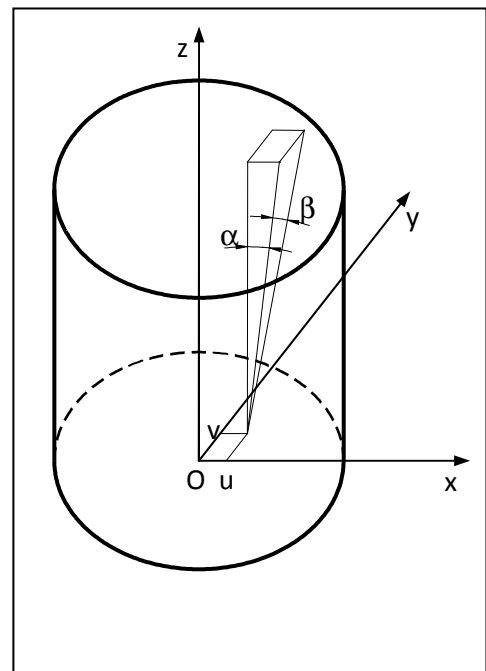


Fig. IV.3.Représentation d'un cylindre

- M_i : les points mesurés

$$M_i = \begin{cases} x_i \\ y_i \\ z_i \end{cases}$$

Pour un point situé dans le plan xOy, on peut écrire, comme pour un cercle :

$$e_i = \xi_i - (u \cos \theta_i + v \sin \theta_i + \Delta R) \dots \dots \dots 56$$

Pour un point situé à une cote z, on a :

$$u(z) = u + \alpha z \dots \dots \dots 57$$

$$v(z) = v + \beta z \dots \dots \dots 58$$

D'où :

$$e_i = \xi_i - [(u + \alpha z_i) \cos \theta_i + (v + \beta z_i) \sin \theta_i + \Delta R] \dots \dots \dots 59$$

Soit :

$$W = \sum_{i=1}^n e_i^2 \dots \dots \dots 60$$

On détermine u, v, α , β et ΔR en minimisant la fonction W. Ce qui se traduit par :

$$\frac{\partial W}{\partial u} = \frac{\partial W}{\partial v} = \frac{\partial W}{\partial \alpha} = \frac{\partial W}{\partial \beta} = \frac{\partial W}{\partial \Delta R} = 0 \dots \dots \dots 61$$

$$W = \sum_{i=1}^n [\xi_i - ((u + \alpha z_i) \cos \theta_i + (v + \beta z_i) \sin \theta_i + \Delta R)]^2 \dots \dots \dots 62$$

Après calcul on trouve :

$$\frac{\partial W}{\partial u} = 0 \dots \dots \dots 63$$

Après dérivation on trouve :

$$\sum_{i=1}^n z_i \sin \theta_i \cos \theta_i + \beta \sum_{i=1}^n z_i \cos^2 \theta_i + u \sum_{i=1}^n z_i \cos^2 \theta_i + v \sum_{i=1}^n \sin \theta_i \cos \theta_i + \Delta R \sum_{i=1}^n \cos \theta_i = \sum_{i=1}^n \xi_i \cos \theta_i \dots\dots\dots 64$$

$$\frac{\partial W}{\partial v} = 0 \dots\dots\dots 65$$

$$-\alpha \sum_{i=1}^n z_i \sin^2 \theta_i + \beta \sum_{i=1}^n z_i \cos \theta_i \sin \theta_i + u \sum_{i=1}^n \cos \theta_i \sin \theta_i + v \sum_{i=1}^n \sin^2 \theta_i + \Delta R \sum_{i=1}^n \sin \theta_i = \sum_{i=1}^n \xi_i \sin \theta_i \dots\dots\dots 66$$

$$\frac{\partial W}{\partial \alpha} = 0 \dots\dots\dots 67$$

$$-\alpha \sum_{i=1}^n z_i^2 \sin^2 \theta_i + \beta \sum_{i=1}^n z_i^2 \cos \theta_i \sin \theta_i + u \sum_{i=1}^n z_i \cos \theta_i \sin \theta_i + v \sum_{i=1}^n z_i \sin^2 \theta_i + \Delta R \sum_{i=1}^n z_i \sin \theta_i = \sum_{i=1}^n \xi_i z_i \sin \theta_i \dots\dots\dots 68$$

$$\frac{\partial W}{\partial \beta} = 0 \dots\dots\dots 69$$

$$-\alpha \sum_{i=1}^n z_i^2 \cos \theta_i \sin \theta_i + \beta \sum_{i=1}^n z_i^2 \cos^2 \theta_i + u \sum_{i=1}^n z_i \cos^2 \theta_i + v \sum_{i=1}^n z_i \cos \theta_i \sin \theta_i + \Delta R \sum_{i=1}^n z_i \cos \theta_i = \sum_{i=1}^n \xi_i z_i \cos \theta_i \dots\dots\dots 70$$

$$\frac{\partial W}{\partial \Delta R} = 0 \dots\dots\dots 71$$

$$-\alpha \sum_{i=1}^n z_i \sin \theta_i + \beta \sum_{i=1}^n z_i \cos \theta_i + u \sum_{i=1}^n \cos \theta_i + v \sum_{i=1}^n \sin \theta_i + n \Delta R = \sum_{i=1}^n \xi_i \dots\dots\dots 72$$

Sous forme matricielle :

$$[A] * \{b\} = \{s\} \dots\dots\dots 73$$

Tel que :

$$[A]= \dots\dots\dots 74$$

$$= \left(\begin{array}{ccccc} \sum_{i=1}^n -z_i^2 \sin^2 \theta_i & \sum_{i=1}^n z_i^2 \sin \theta_i \cos \theta_i & \sum_{i=1}^n z_i \sin \theta_i \cos \theta_i & \sum_{i=1}^n z_i \sin^2 \theta_i & \sum_{i=1}^n z_i \sin \theta_i \\ \sum_{i=1}^n z_i^2 \sin \theta_i \cos \theta_i & -\sum_{i=1}^n z_i^2 \cos^2 \theta_i & -\sum_{i=1}^n z_i \cos^2 \theta_i & -\sum_{i=1}^n z_i \sin \theta_i \cos \theta_i & -\sum_{i=1}^n z_i \cos \theta_i \\ \sum_{i=1}^n z_i \sin \theta_i \cos \theta_i & -\sum_{i=1}^n z_i \cos^2 \theta_i & -\sum_{i=1}^n \cos^2 \theta_i & -\sum_{i=1}^n \sin \theta_i \cos \theta_i & -\sum_{i=1}^n \cos \theta_i \\ \sum_{i=1}^n z_i \sin^2 \theta_i & \sum_{i=1}^n z_i \sin \theta_i \cos \theta_i & -\sum_{i=1}^n \sin \theta_i \cos \theta_i & -\sum_{i=1}^n \sin^2 \theta_i & -\sum_{i=1}^n \sin \theta_i \\ -\sum_{i=1}^n z_i \sin \theta_i & \sum_{i=1}^n z_i \cos \theta_i & \sum_{i=1}^n \cos \theta_i & \sum_{i=1}^n \sin \theta_i & \sum_{i=1}^n n \end{array} \right)$$

$$\{b\} = \left(\begin{array}{c} \sum_{i=1}^n z_i \xi_i \sin \theta_i \\ -\sum_{i=1}^n z_i \xi_i \cos \theta_i \\ -\sum_{i=1}^n \xi_i \cos \theta_i \\ -\sum_{i=1}^n \xi_i \sin \theta_i \\ \sum_{i=1}^n \xi_i \end{array} \right) \dots\dots\dots 75$$

Et

$$\{s\} = \begin{pmatrix} \alpha \\ \beta \\ u \\ v \\ \Delta R \end{pmatrix} \dots\dots\dots 76$$

Les angles sont définis comme :

$$\sin \theta_i = \frac{y_i}{\sqrt{x_i^2 + y_i^2}} \dots\dots\dots 77$$

$$\cos \theta_i = \frac{x_i}{\sqrt{x_i^2 + y_i^2}} \dots\dots\dots 78$$

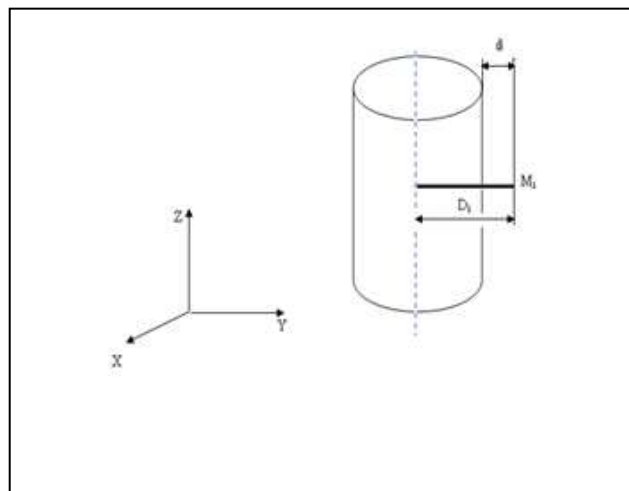


Fig. IV.4. La distance d'un point par rapport à la circonférentiel d'un cylindre

Calcul de la distance 'd_i'

On a :

$$M_i(x_i, y_i, z_i)$$

L'axe est défini par un point et un vecteur unitaire

On prend :

$$\begin{cases} \text{un point : } A(x_a, y_a, z_a) \\ \text{vecteur unitaire } \vec{u} (a, b, c) \end{cases}$$

Et :

$$\vec{u} : \begin{cases} a = \cos \theta_i \\ b = \sin \theta_i \\ c = 0 \end{cases}$$

Ainsi on choisit un autre point B (x_b, y_b, z_b) qui appartient au axe :

$$B : \begin{cases} x_b = x_a + [(x_i - x_a)a + (y_i - y_a)b + (z_i - z_a)c]a \\ y_b = y_a + [(x_i - x_a)a + (y_i - y_a)b + (z_i - z_a)c]b \\ z_b = z_a + [(x_i - x_a)a + (y_i - y_a)b + (z_i - z_a)c]c \end{cases} \dots\dots\dots 79$$

Alors :

$$D_i = \left| \frac{(x_i - x_b) + (y_i - y_b) + (z_i - z_b)}{\sqrt{x_b x_i + y_b y_i + z_b z_i}} \right| \dots\dots\dots 80$$

$$d_i = D_i - R \dots\dots\dots 81$$

➤ Optimisation d'une sphère :

On réfèrent à [11] pour une sphère a quatre paramètres :

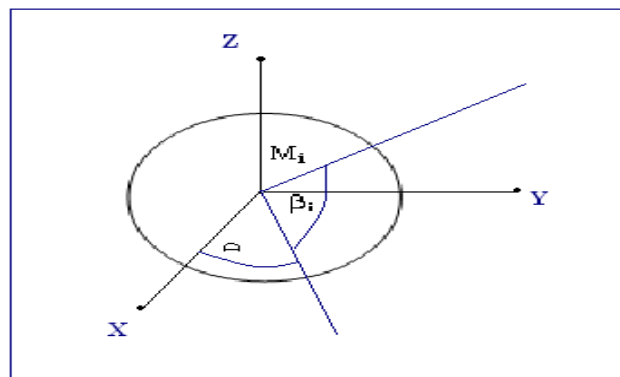


Fig. IV.5. Optimisation d'une sphère

- Trois paramètres de translation $\begin{vmatrix} u \\ v \\ w \end{vmatrix}$
- Aucun paramètre de rotation
- Un seul paramètre $|r$

En se référant à l'optimisation d'un cercle [11]

On a :

$$\xi_i = \sqrt{x_i^2 + y_i^2 + z_i^2} - r \dots\dots\dots 82$$

Et pour la normal

$$\vec{n}_i = \begin{vmatrix} \cos \beta_i \cos \theta_i \\ \cos \beta_i \sin \theta_i \\ \sin \beta_i \end{vmatrix} \dots\dots\dots 83$$

Ainsi pour chaque points M_i le vecteur qui passe par le centre et ce points c'écrit par :

$$\vec{M}_i = \begin{vmatrix} r \cos \beta_i \cos \theta_i \\ r \cos \beta_i \sin \theta_i \\ r \sin \beta_i \end{vmatrix} \dots\dots\dots 84$$

Telle que les angles se définissent par :

$$\sin \theta_i = \frac{y_i}{\sqrt{x_i^2 + y_i^2}}, \quad \sin \beta_i = \frac{z_i}{\sqrt{x_i^2 + y_i^2 + z_i^2}} \dots\dots\dots 85$$

$$\cos \theta_i = \frac{x_i}{\sqrt{x_i^2 + y_i^2}}, \quad \cos \beta_i = \frac{\sqrt{x_i^2 + y_i^2}}{\sqrt{x_i^2 + y_i^2 + z_i^2}} \dots\dots\dots 86$$

En se basant sur l'optimisation d'un cercle :

Pour un point situé sur la périphérie de la sphère, les écarts 'e_i' est donné par :

$$e_i = \xi_i - (u \cos \beta_i \cos \theta_i + v \cos \beta_i \sin \theta_i + w \sin \beta_i + \Delta R) \dots\dots\dots 87$$

En utilisant la même méthode de l'optimisation, par les moindres carrés :

$$W = \sum_{i=1}^n e_i^2 \dots\dots\dots 88$$

On détermine u, v, w, ΔR en minimisant la fonction W. Ce qui se traduit par :

$$\frac{\partial W}{\partial u} = \frac{\partial W}{\partial v} = \frac{\partial W}{\partial w} = \frac{\partial W}{\partial \Delta R} = 0 \dots\dots\dots 89$$

$$W = \sum_{i=1}^n [\xi_i - (u \cos \beta_i \cos \theta_i + v \cos \beta_i \sin \theta_i + w \sin \beta_i + \Delta R)]^2 \dots\dots\dots 90$$

Après calcul on trouve :

$$\frac{\partial W}{\partial u} = 0 \dots\dots\dots 91$$

Après dérivation on trouve :

$$\sum_{i=1}^n \xi_i \cos \beta_i \cos \theta_i = u \sum_{i=1}^n \cos^2 \beta_i \cos^2 \theta_i + v \sum_{i=1}^n \cos^2 \beta_i \sin \theta_i \cos \theta_i + w \sum_{i=1}^n \cos \beta_i \cos \theta_i \sin \beta_i + \Delta R \sum_{i=1}^n \cos \beta_i \cos \theta_i \dots\dots 92$$

$$\frac{\partial W}{\partial v} = 0 \dots\dots\dots 93$$

$$\sum_{i=1}^n \xi_i \cos \beta_i \sin \theta_i = u \sum_{i=1}^n \cos^2 \beta_i \cos \theta_i \sin \theta_i + v \sum_{i=1}^n \cos^2 \beta_i \sin^2 \theta_i + w \sum_{i=1}^n \cos \beta_i \cos \theta_i \sin \beta_i + \Delta R \sum_{i=1}^n \cos \beta_i \sin \theta_i \dots\dots 94$$

$$\frac{\partial W}{\partial w} = 0 \dots\dots\dots 95$$

$$\sum_{i=1}^n \xi_i \sin \beta_i = u \sum_{i=1}^n \cos \beta_i \cos \theta_i \sin \beta_i + v \sum_{i=1}^n \cos \beta_i \sin \beta_i \sin \theta_i + w \sum_{i=1}^n \sin^2 \beta_i + \Delta R \sum_{i=1}^n \sin \beta_i \dots\dots\dots 96$$

$$\frac{\partial W}{\partial \Delta R} = 0 \dots\dots\dots 97$$

$$\sum_{i=1}^n \xi_i = u \sum_{i=1}^n \cos \beta_i \cos \theta_i + v \sum_{i=1}^n \cos \beta_i \sin \theta_i + w \sum_{i=1}^n \sin \beta_i + n \Delta R \dots\dots\dots 98$$

Sous forme matricielle :

$$[A] * \{b\} = \{s\} \dots\dots\dots 99$$

Tel que :

$$[A] = \dots\dots\dots 100$$

$$\left(\begin{array}{cccc} \sum_{i=1}^n \cos^2 \beta_i \cos^2 \theta_i & \sum_{i=1}^n \cos^2 \beta_i \cos \theta_i \sin \theta_i & \sum_{i=1}^n \cos \beta_i \cos \theta_i \sin \beta_i & \sum_{i=1}^n \cos \beta_i \cos \theta_i \\ \sum_{i=1}^n \cos^2 \beta_i \cos \theta_i \sin \theta_i & \sum_{i=1}^n \cos^2 \beta_i \sin^2 \theta_i & \sum_{i=1}^n \cos \beta_i \sin \theta_i \sin \beta_i & \sum_{i=1}^n \cos \beta_i \sin \theta_i \\ \sum_{i=1}^n \cos \beta_i \cos \theta_i \sin \beta_i & \sum_{i=1}^n \cos \beta_i \sin \beta_i \sin \theta_i & \sum_{i=1}^n \sin^2 \beta_i & \sum_{i=1}^n \sin \beta_i \\ \sum_{i=1}^n \cos \beta_i \cos \theta_i & \sum_{i=1}^n \cos \beta_i \sin \theta_i & \sum_{i=1}^n \sin \beta_i & n \end{array} \right)$$

$$\{b\} = \begin{pmatrix} \sum_{i=1}^n \xi_i \cos\theta_i \cos\beta_i \\ \sum_{i=1}^n \xi_i \sin\theta_i \cos\beta_i \\ \sum_{i=1}^n \xi_i \sin\beta_i \\ \sum_{i=1}^n \xi_i \end{pmatrix} \dots\dots\dots 101$$

$$\{s\} = \begin{pmatrix} u \\ v \\ w \\ \Delta R \end{pmatrix} \dots\dots\dots 102$$

Calcul la distance 'd_i' :

On calcul la distance 'd_i' en référence à le cas d'un cercle :

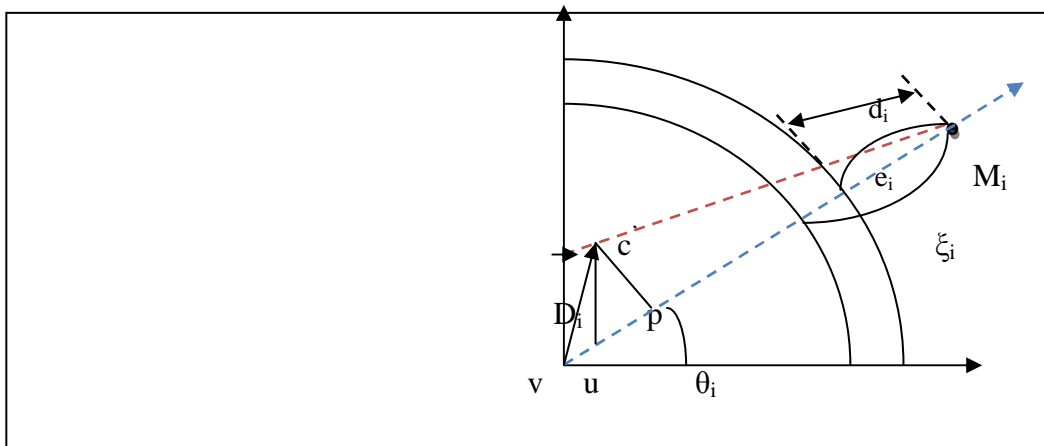


Fig. IV.6. La distance par rapport à la sphère

On a :

$$d_i = \sqrt{(x_i - u)^2 + (y_i - v)^2} - \left(\sqrt{x_i^2 + y_i^2} - u \cos\theta_i - v \sin\theta_i \right) \dots\dots\dots 103$$

Dans le cas (d_i-e_i) est maximum

$$\vec{D}_i \text{ est } \perp \vec{n}_i, \theta_i=0 \dots\dots\dots 104$$

$$x_i=R+\xi_i \dots\dots\dots 105$$

$x_i=R_i$	106
$d_i - e_i = \sqrt{R_i^2 + v_i^2} - R_i$	107
On fait un développement limité le $\sqrt{R_i^2 + v_i^2}$ et $R_i=R$	108
$ d_i - e_i = \frac{v^2}{2R}$	109
Dans le cas d'une sphère, on aurait de la même manière en se plaçant dans le plan M_i , c , c' , l'erreur maximum est	
$ d_i - e_i = \frac{u^2+v^2+w^2}{2R}$	110
D'où :	
$d_i = e_i + \frac{u^2+v^2+w^2}{2R}$	111

III.2 Résultats et interprétations :

Pour étudier l'état de surface des pièces mentionnées précédemment, on a réalisé quelques programmes de calcul dont le but de traiter les nuages des points qu'ils ont fait, l'analyse de ces résultats permet de calculer les écarts après l'optimisation par la méthode des moindres carrés. Les résultats finaux nous permettent de déterminer les caractéristiques d'états de surface en 3D.

➤ Traitement du nuage de points :

Le traitement des nuages de points est effectué en utilisant le logiciel de programmation Matlab 7.0, la programmation a permis de :

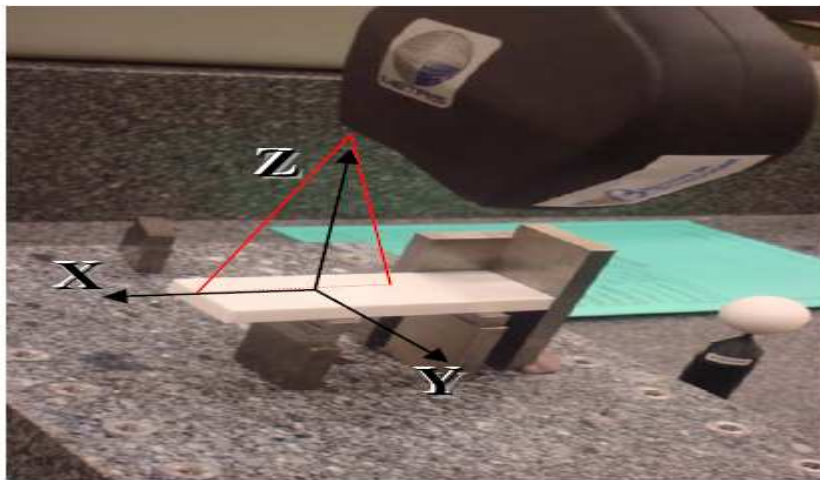
- La visualisation des pièces mesurées à partir des fichiers numériques obtenus
- La séparation des plans pour une pièce plane brute et séparation des points pour d'autres pièces, le but est d'éliminer l'effet des bords ou les rayons laser, ainsi pour une meilleure optimisation

- La représentation des écarts en 3D permet de visualiser l'état de surface
- La représentation graphique des caractéristiques d'états de surface (rugosité)

➤ **Cas d'un plan :**

• **Pièce brut (en bois) :**

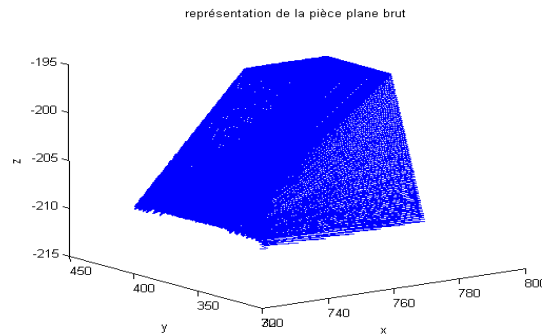
- La représentation de cette pièce (fig. IV.9) se fait après prélèvement des points avec MMT, on réalise quelques programs on utilisant Matlab pour avoir la séparation des plans (Fig. IV.10)



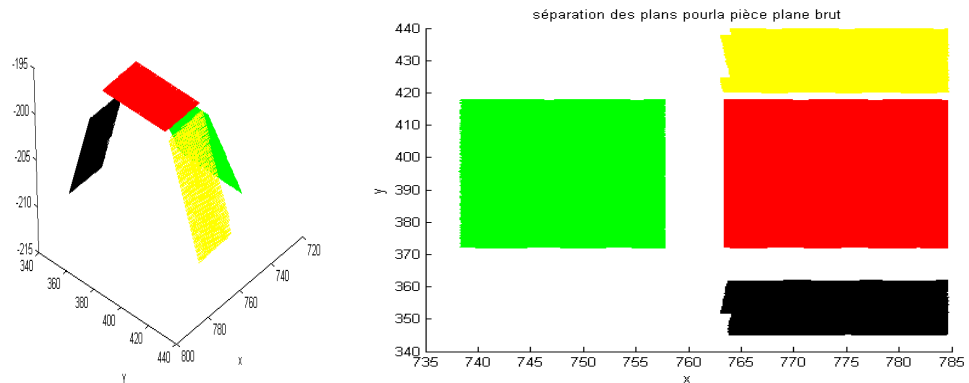
« Fig. IV.7. Dispositif expérimental de caractérisation géométrique du plan laser »



« Fig. IV.8. Représentation de la pièce plane brut en 3D sur Solid Works »



« Fig. IV.9. Représentations de la pièce plane sur Matlab »



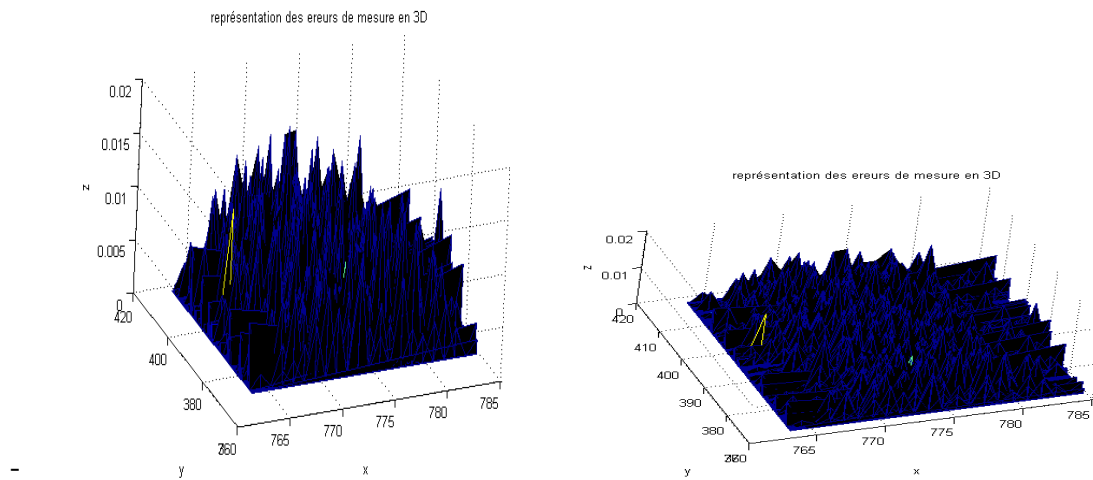
« Fig. IV.10. Séparation des plans »

- Pour calculer les caractéristiques d'états de surface, on s'intéresse en plan supérieur, l'optimisation de ce plan nous amène à obtenir les valeurs maximum et minimum des écarts 'e_i', la valeur maximum e_{imax}= 0.01836 μm (Tableau IV .1)

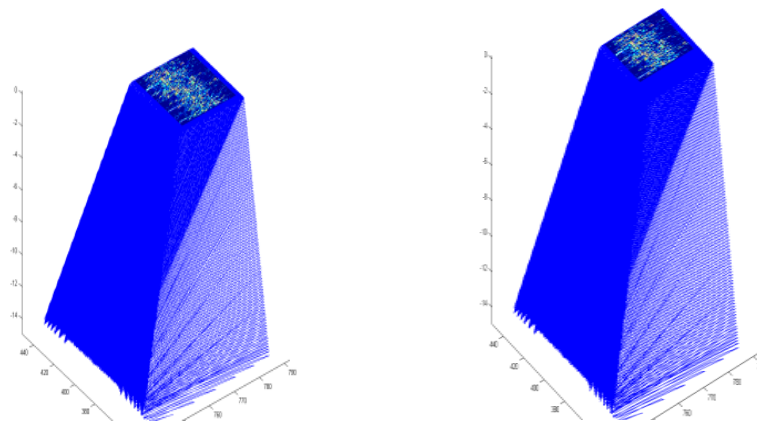
Les résultats	Pièces planes		Pièces cylindriques		Pièce sphérique
	Pièce brut	Pièce lisse	Pièce brut	Pièce lisse	Pièce lisse (aluminium)
Max(e _i) μm	0.0184	0.2223	0.0812	3.5186 * 10 ^{^-8}	4.6517 * 10 ^{^-4}
Min(e _i) μm	2.0071 * 10 ^{^-6}	3.2200 * 10 ^{^-6}	0.0748	5.5647 * 10 ^{^-8}	4.1253 * 10 ^{^-9}
ΔR mm	—	—	0.0260	-0.0103	-0.0015

« Tableau IV.1. Les résultats obtenus après l'optimisation »

- On voit bien sur la figure (fig. IV. 11), la distribution des écarts sur la surface se fait en désordre, se qui explique que à chaque fois le balayage avance suivant une direction, les caractéristiques d'états de surface changes.

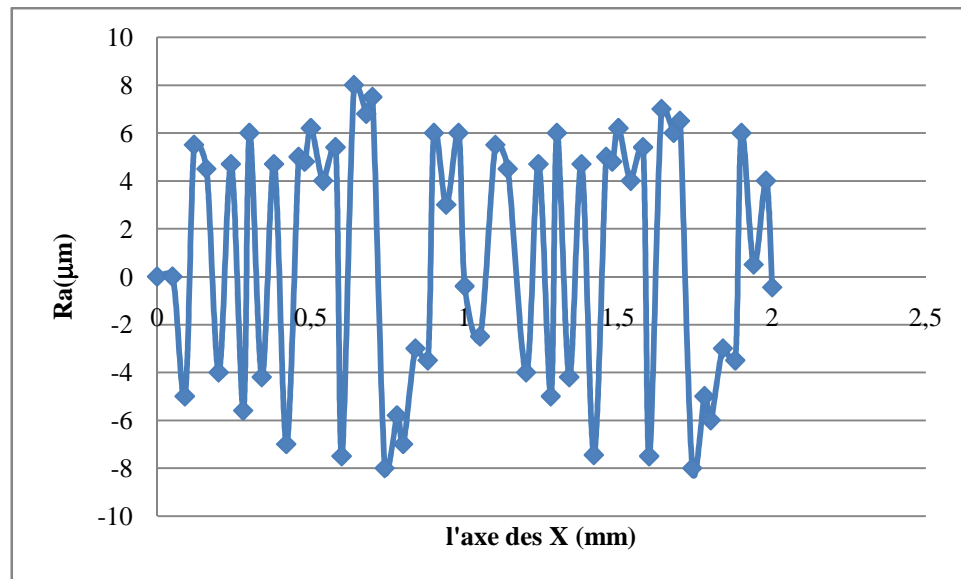


« Fig. IV.11. Représentation des erreurs de mesures, pièce en bois »



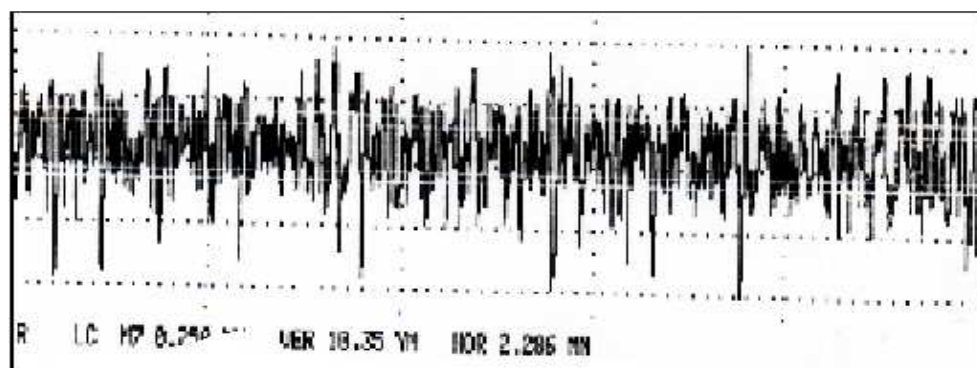
« Fig. IV.12. Représentation de la pièce avec les écarts »

- Les caractéristiques calculées dans Tableau .IV.3 sont acceptables si on compare avec les résultats mesurés (Tableau. IV.2).



« Fig. IV.13. Graphe de la rugosité pour le plan brut »

- La représentation du profil expérimentalement se fait sur la MMT avec un Perthometer S8P 5.6 (Fig. IV.14)



« Fig. IV.14. Graphe de la rugosité, pièce brute scannée sur Perthometer S8P 5.6 »

La valeur moyenne de la rugosité est de l'ordre 6.0455 μm , ce résultat est très important due :

- Matériaux :
 - ✓ Libération des contraintes internes
 - ✓ Hétérogénéité
- Machine :
 - ✓ Capteur mal calibrer influe sur le prélèvement des points (les mesures)
 - ✓ Position des caméras
 - ✓ Usure des organes et les vibrations (matériel de mesure, pièce à mesurer...)

Paramètres d'états de surface	Cylindre (surface brute, Ø49,38)	Cylindre (surface lisse, Ø60,02)	Sphère (pièce en aluminium, Ø80,40)	Plan (surface brillante, pièce en aluminium)	Plan (surface mate, artefact en bois, plan 1)
Ra (µm)	4,39	0,20	0,6	2,53	4,82
Rz (µm)	27,39	2,25	7,2	14,14	37,37
Rmax (µm)	33,20	2,68	—	16,46	41,38
Rp (µm)	21,36	1,15	—	8,25	17,95
Rpm (µm)	14,05	0,91	2,9	7,73	15,67
Rq (µm)	5,55	0,25	0,8	3,11	6,12
Rt (µm)	36,49	2,88	14,5	16,46	41,38
Pt (µm)	131,7	3,91	16,1	18,78	55,31
Wt (µm)	106,0	2,01	13,4	6,63	24,63

« Tableau. IV.2 Paramètres caractéristiques des états de surfaces mesurées »

Paramètres d'états de surface (µm)	Cylindre (surface brute, Ø49,38)	Cylindre (surface lisse, Ø60,02)	Sphère (pièce en aluminium, Ø80,40)	Plan (surface brillante, pièce en aluminium)	Plan (surface mate, artefact en bois, plan 1)
Sa (µm)	3.2391	0.1543	0.8274	2.0944	6.0455
Sz (µm)	—	—	—	—	—
Smax (µm)	—	—	—	—	—

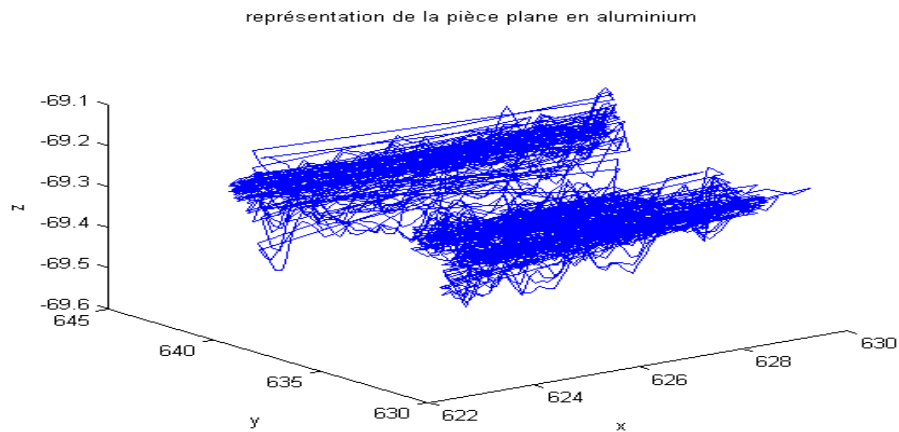
Sp (μm)	—	—	—	—	—
Spm (μm)	—	—	—	—	—
Sq (μm)	9.0494	1.5427	0.9066	2.1865	6.9492
St (μm)	—	—	—	—	—
Pt (μm)	—	—	—	—	—
Wt (μm)	—	—	—	—	—
S _{sk}	0.7764	-9.9999	17.7665	0.9545	-0.8730
S _{ku}	1.5116e-005	0.0164	0.0392e-005	0.0014	1.5594e-005
S _{Δq}	6.3294e-005	2.4409e-006	0.3403e-020	2.3674e-004	0.0024
S _{sc}	0.0000	0.0000	1.0000	0.0000	0.0000

« Tableau. IV.3 Paramètres caractéristiques des états de surfaces calculées »

- Pour les caractéristiques qui sont mentionnées dans le tableau IV. 3 ; facteur d'asymétrie est de l'ordre 0.8 μm , indique que la surface n'est pas symétrique. Le facteur d'aplatissement et les paramètres hybrides sont très négligeables, montre que la surface n'est pas aplatisse à cause du matériau fabriqué de cette pièce (bois).

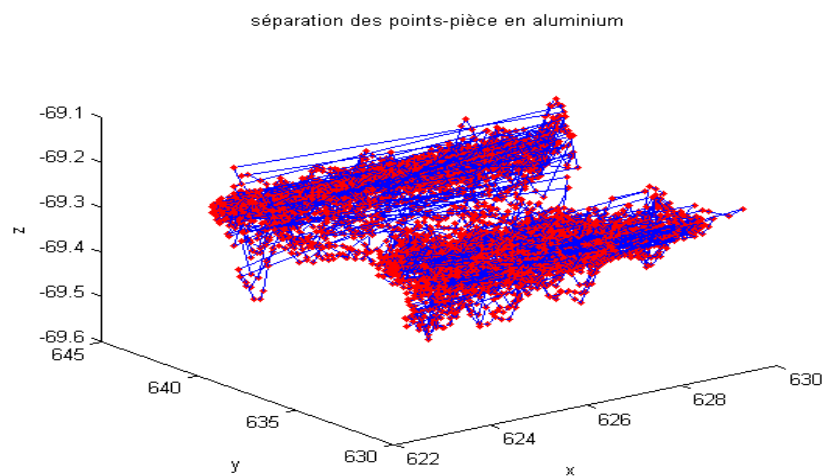
•Pièce en aluminium :

- La pièce mesurée est contient un perçage, lord de mesurage, ils ont prene un échantillon pour éviter d'avoir la déflexion de la lumière dans la partie percé



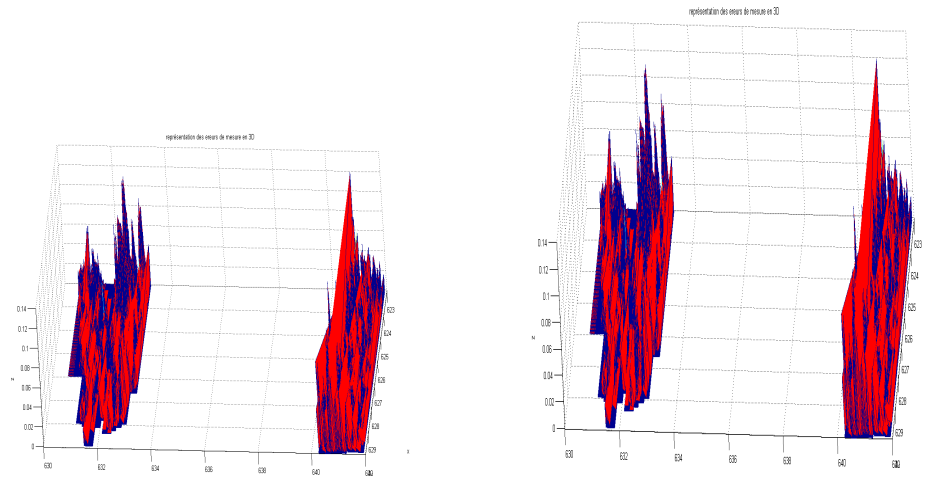
« Fig. IV.15. Représentation de la pièce (plan en aluminium) »

- Avec les mesures données, nous ramène à présenté l'échantillon en deux parties, avec un nuage des points (fig. IV.16), cette séparation due au matériau (aluminium) qui influe sur la projection de la lumière sur la pièce et le retour à la caméra.

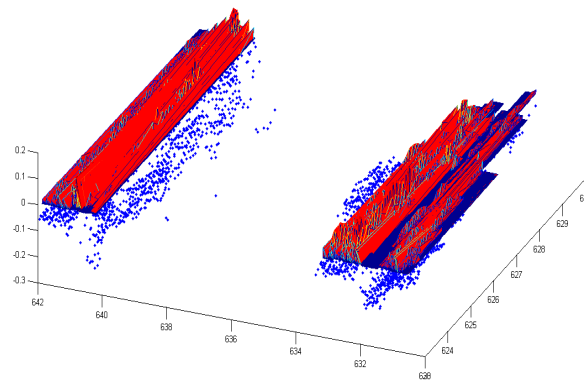


« Fig. IV.16. Séparation des points pour la pièce en aluminium »

- L'optimisation nous donne les écarts maximum et minimum qui sont représenté en 3D sur la fig. IV.17

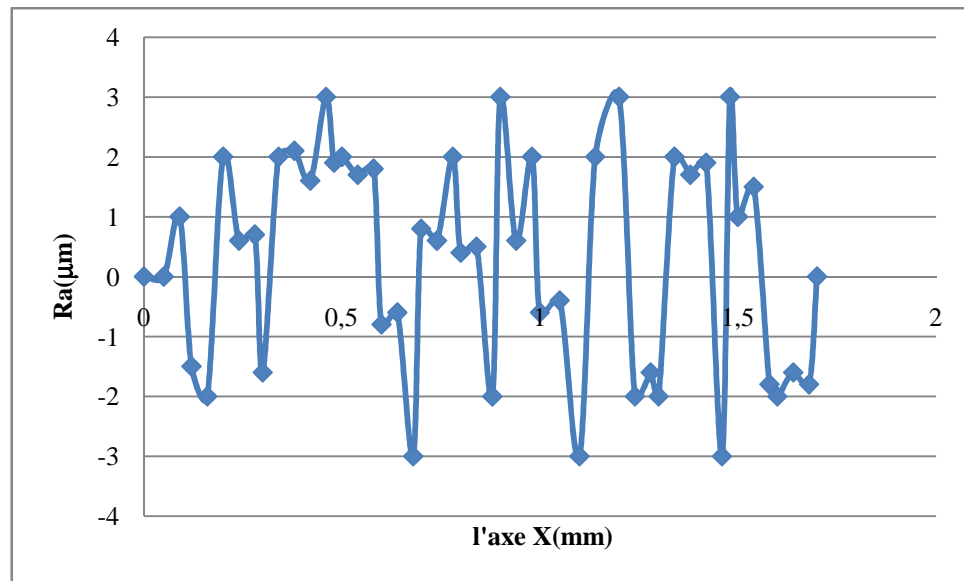


« Fig. IV.17. Représentation des erreurs »



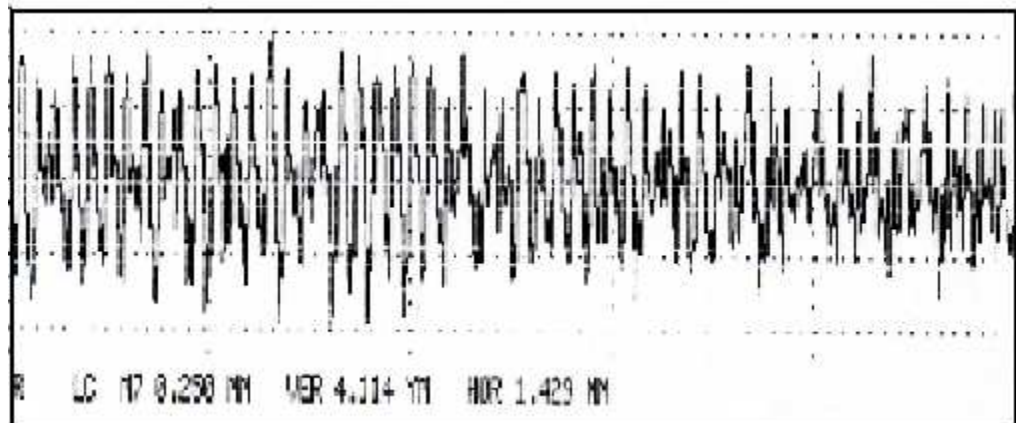
« Fig. IV.18. La représentation de la pièce avec les erreurs »

- Si on compare les caractéristiques calculées avec celles mesurées, on voit bien qui est dans la plage. Et entre les valeurs obtenues pour le plan brut et surface lisse, les résultats de la pièce en aluminium sont très petites par rapport à celle de la pièce en bois, ça montre que le matériau influé sur leurs états de surface (la valeur de rugosité est de l'ordre $2 \mu\text{m}$ (voir Fig. IV.19) par rapport à $6.0455 \mu\text{m}$)



« Fig. IV.19. Graphe de la rugosité pour surface plane lisse »

- Avec le même instrument, ils ont obtenu le profil de la rugosité pour la pièce plane en aluminium pour la position du capteur à $\alpha=45^\circ$, $\beta=0$ (Fig. IV. 20)



« Fig. IV. 20 Représentation du profil de la rugosité scanné sur Perthometer S8P

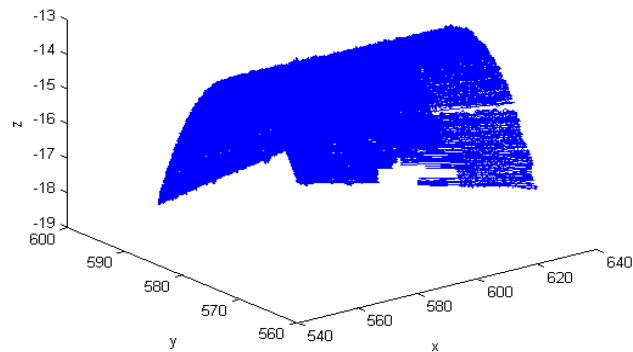
5.6 »

➤ **Cas d'un cylindre :**

• **Cylindre brut :**

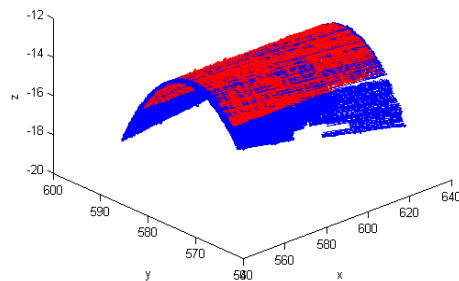
- Pour avoir ces résultats, on a suivi la même procédure que le cas d'un plan, alors la représentation se fait avec prélèvement des points (fig. IV.21) et la séparation des points (fig. IV. 22)

représentation un cylindre brut en 3D

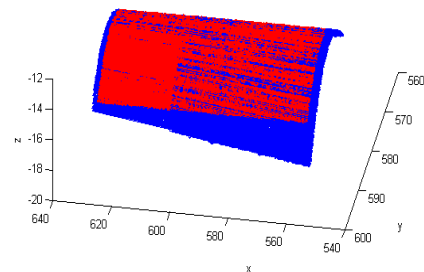


« Fig. IV.21. Représentation d'un cylindre brut »

représentation un cylindre brut avec séparation des points en 3D



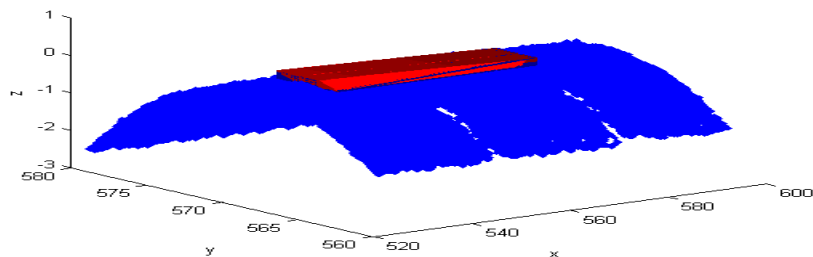
représentation un cylindre brut avec séparation des points en 3D



« Fig. IV.22. Séparation des points pour un cylindre brut »

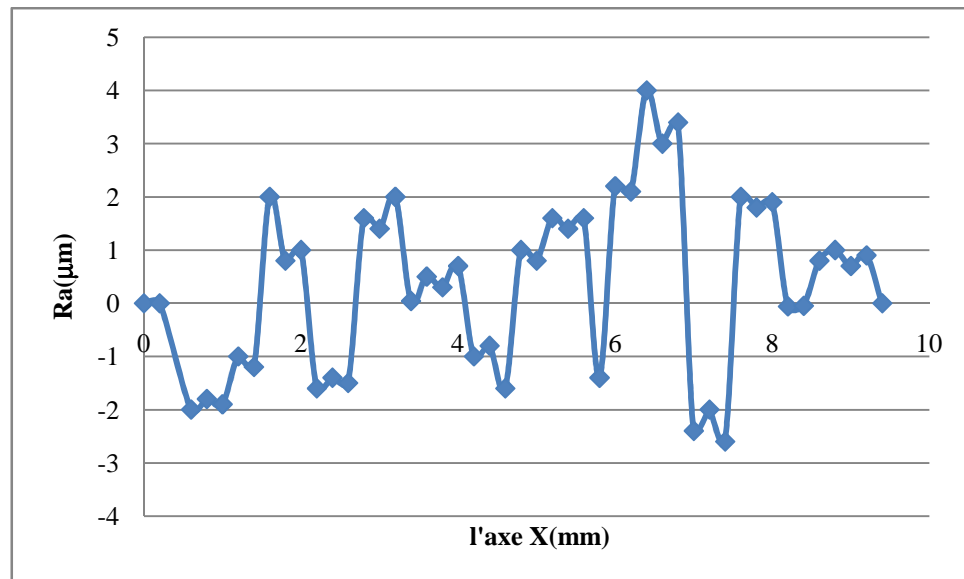
- Après l'optimisation, les écarts, e_i sont de l'ordre $8.1231\mu\text{m}$ (valeurs amplifiées) et on voit bien qu'il y a un échantillon où les écarts sont dominés sur cette surface (Fig. IV.23)

représentation de cylindre brut avec les erreurs en 3D



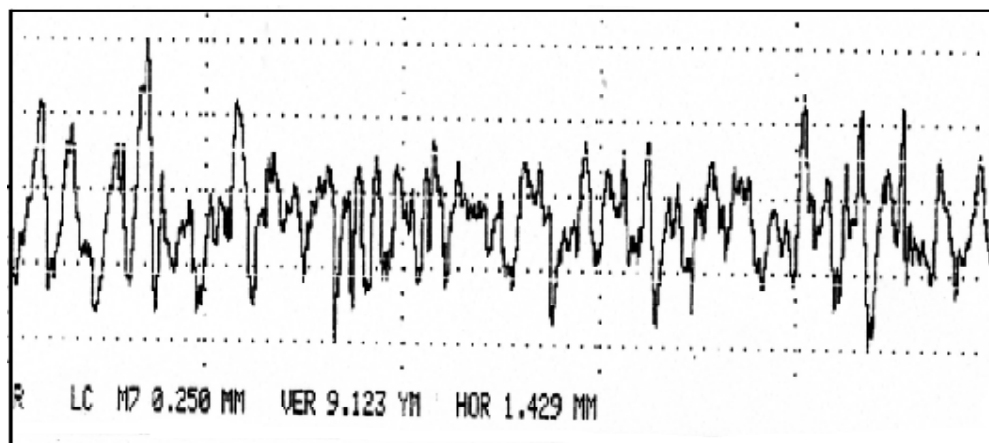
« Fig. IV.23.Représentation de la pièce avec les écarts »

- Le tableau des résultats calculés, nous donne les différentes caractéristiques d'états pour cette surface, par exemple la rugosité est de l'ordre $3.2391\mu\text{m}$ acceptable par rapport à celle mesuré (pour les autres valeurs voir Fig. IV.24).



« Fig. IV.24. Graph de la rugosité pour le cas d'un cylindre brut »

- Expérimentalement, les valeurs de la rugosité pour cette surface sont définies sur la (Fig. IV.25), pour une position du capteur à $\alpha=0$, $\beta=0$, on compare entre les deux graphs, on voit bien que l'allure du profil est le même.

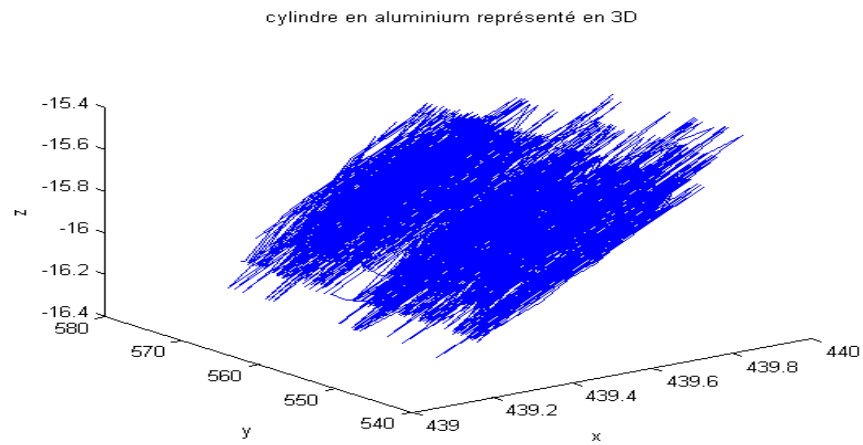


« Fig. IV.25. Graph expérimental de la rugosité pour la pièce brute »

• Cylindre lisse :

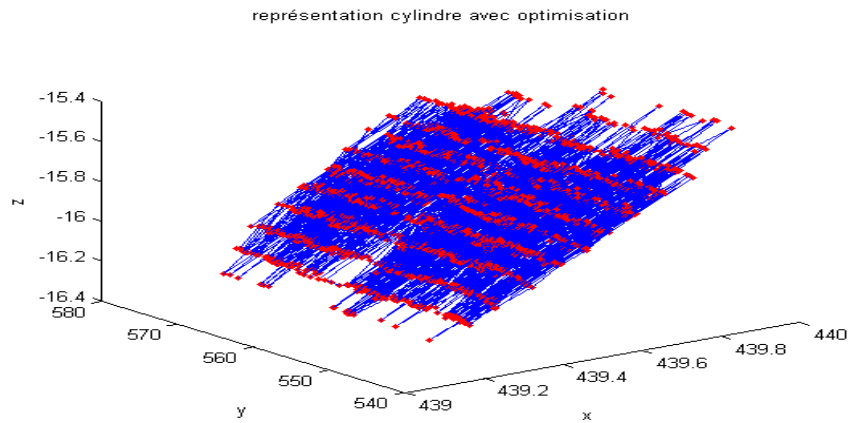
- A cause de matériau utilisé pour la fabrication de cette pièce (aluminium), ils ont prés un échantillon pour les mesures

- La représentation d'un cylindre (Fig. IV.26) montre que le balayage se fait dans une petite place

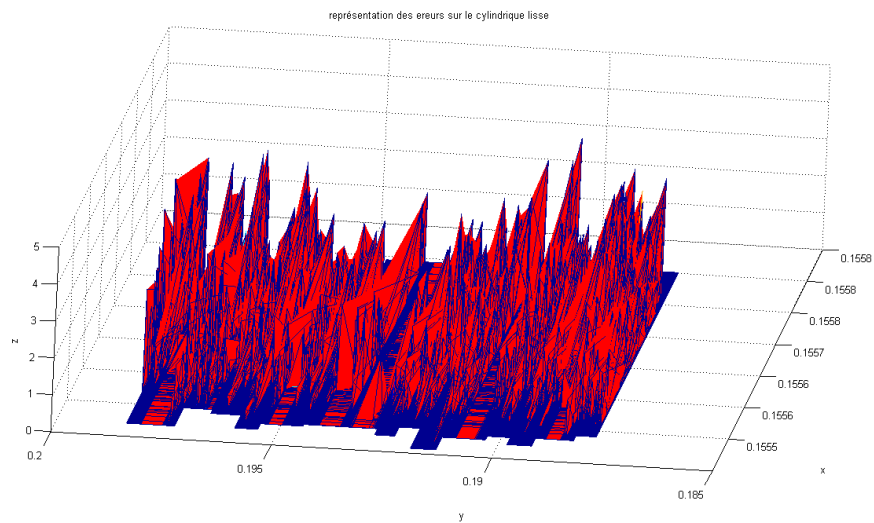


« Fig. IV.26. Représentation d'un cylindre lisse »

- Le but de l'optimisation est d'avoir les maximum et minimum des écarts, les e_i sont représentés sur la Fig. IV.28.

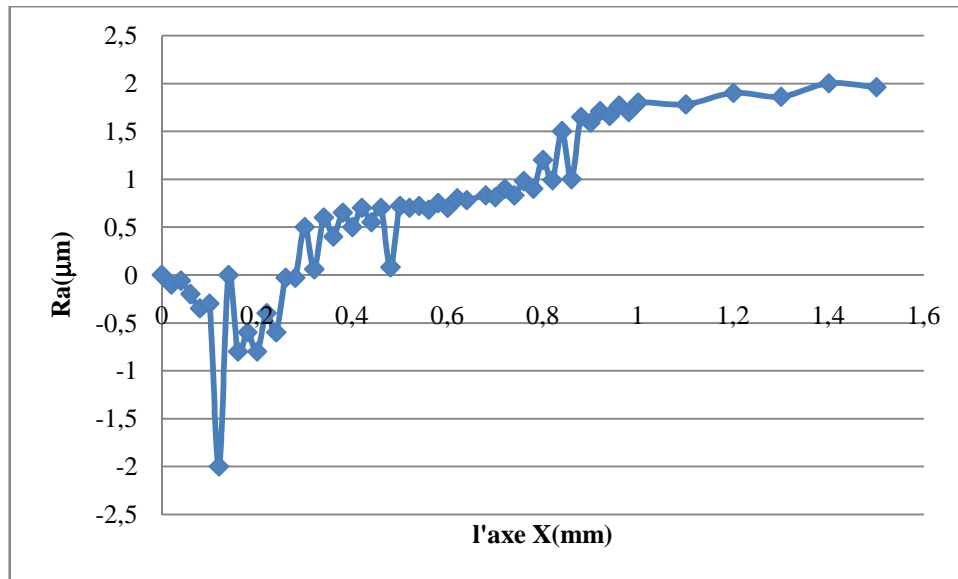


« Fig. IV.27. La pièce optimisée »



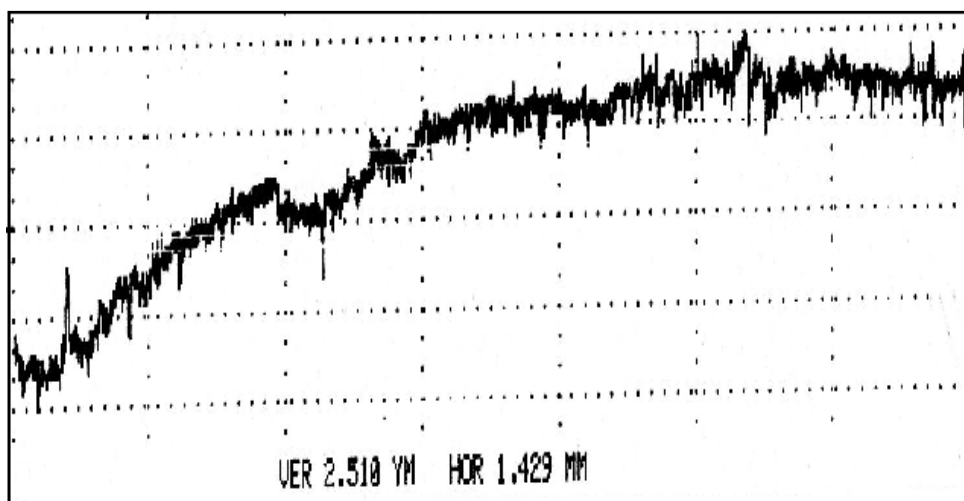
« Fig. IV.28. La représentation les écarts pour un cylindre lisse »

- Les valeurs de tableau IV.3 montrent que les caractéristiques calculées sont dans les normes par rapport à celles mesurés.



« Fig. IV.29. Graph de la rugosité pour un cylindre lisse »

- Sur le graph qui présente les valeurs maximum et minimum de la rugosité pour cette pièce, on voit bien qu'à chaque fois le balayage (mesurage) avance, la rugosité augmente plus rapidement jusqu'à une valeur de x, la rugosité stabilise ou une valeur déterminer.



« Fig. IV.30. Graphe de la rugosité pour le cylindre lisse scanné »

- Le relevé des points mesurés nous donne l'allure du profil scanné sur Perthometer S8P 5.6, pour une position de $\alpha=45^\circ$, $\beta=0$

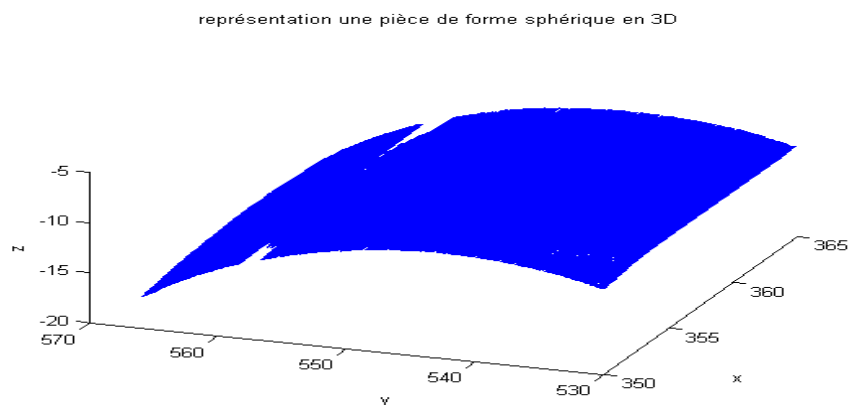
Remarque :

- Pour calculer les valeurs des caractéristiques d'états de surface pour le cas d'un cylindre, on a basé sur un plan

➤ **Cas d'une sphère :**

- Pour avoir les caractéristiques de cette pièce, on suit la même procédure que les autres

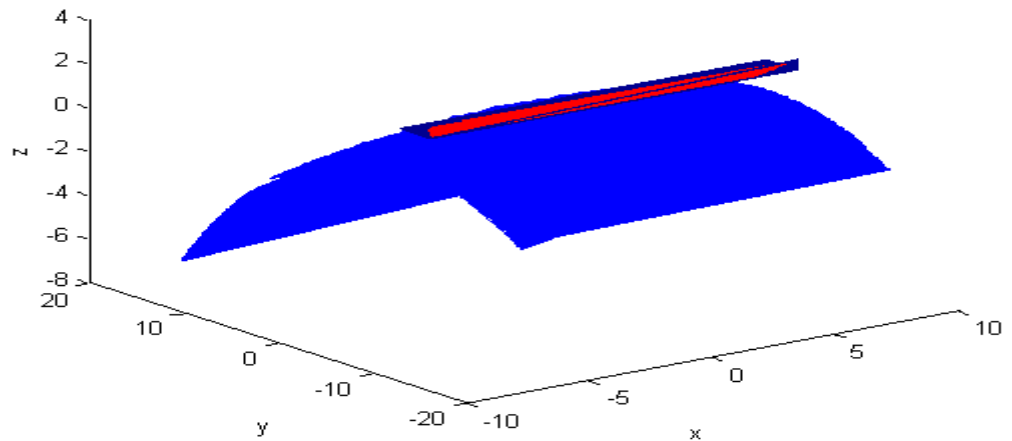
- La représentation de la sphère (Fig. IV.31), montre que les mesures sont effectuées sur un échantillon, car la forme de la pièce n'aide pas à faire cette étude sur toute la surface



« Fig. IV.31. Représentation d'une sphère »

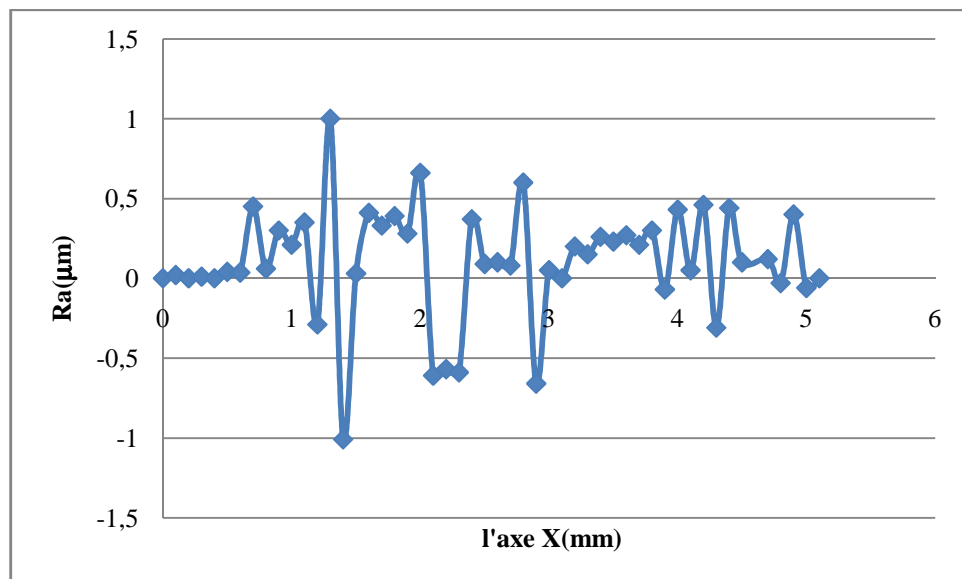
- Les écarts obtenus après optimisation, sont de l'ordre $4 \mu\text{m}$ (valeur amplifiée), elles sont négligeables, même la distance qui est maximum à $0.0015 \mu\text{m}$, montre que les points mesurés confondent aux points théoriques

regroupement les erreurs avec la pièce sur la même figure



« Fig. IV.32. Regroupement de la pièce avec les écarts »

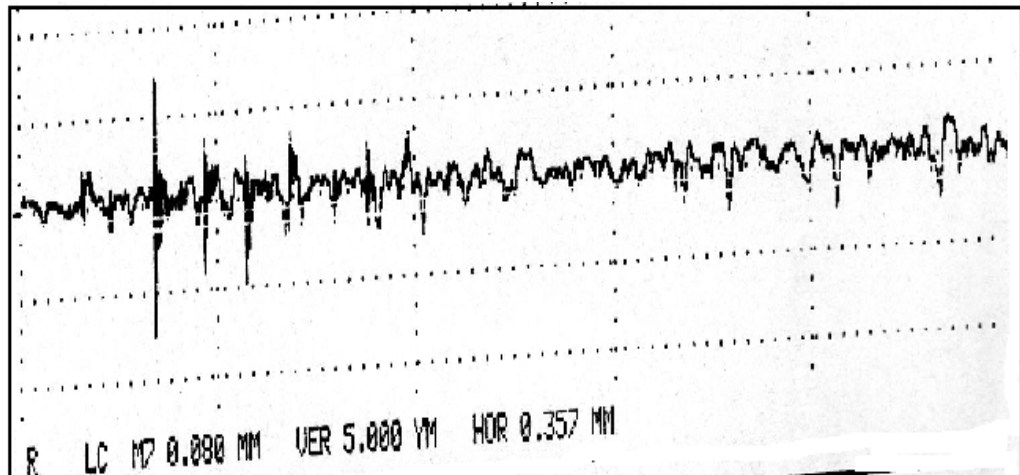
- Les valeurs des caractéristiques calculées sont acceptables si on les compare avec les résultats mesurés. Pour la rugosité (Fig. IV.33) est de l'ordre $0.8274\mu\text{m}$, cette valeur montre que la pièce à un bon état de surface, ce qui redémontre que le matériau utilisé influe sur l'état de surface d'une pièce.



« Fig. IV.33. Graph de la rugosité de la surface sphérique »

- Seulement si on voit le facteur d'asymétrie (d'ordre $17.7\mu\text{m}$) qu'est très important, on peut dire que la sphère n'est pas symétrique.

- La position de capteur pour avoir l'allure de la Fig. IV.34 est de $\alpha=0$, $\beta=0$



« Fig. IV.34 La représentation les valeurs expérimentales de la rugosité »

Remarque :

- Tous les résultats calculés pour les caractéristiques d'états de surfaces, sont obtenues on appliquant les formules (chapitre III) d'après la norme ISO 25178

IV. Conclusion :

Dans ce chapitre, globalement, on a fait une étude sur l'état de surface pour quelques pièces mécaniques de formes différentes.

Le but de celle-ci est de montre que les caractéristiques de mesure d'état de surface sont influées par le matériau utilisé et la forme de la surface mesurée.

L'importance des mesures 3D sans contact, ce voit clairement dans le cas de la sphère. Si on utilise un instrument de mesure avec contact, la plage de mesure diminue, car le palpeur se pose sur un point de contact (le plus haut suivant le rayon) et se déplace suivant la périphérie. L'expérience montre que le palpeur se déplace suivant une direction risque d'être n'est pas en contact avec la surface, donc il y a un pourcentage plus important d'avoir les mesures erronées. Par contre les mesures sans contact nous donne des mesures sur un échantillon plus grand, puisque le capteur envoi la lumière dans différentes directions sur la surface à mesurer et avec la réflexion de cette lumière, les cameras peuvent avoir les résultats sous un nuage des points (plusieurs mesures dans un temps plus court).

CONCLUSION GENERALE

Le développement des appareils et des instruments de mesure des états de surface conduit à changer la méthode d'évaluation des paramètres caractérisant ces surfaces.

En effet, les moyens classique permettent une mesure précise mais sont à contact. Ce qui introduit une usure du palpeur. D'autre part, leur utilisation est onéreuse pour des surfaces à très faible rayon de courbure. Ils ne fournissent que des informations suivant la direction de mesurage.

Par contre, les moyens optiques permettent la mesure sans contact (aucune déformation de la pièce ou du palpeur ou usure) et apportent de nombreux avantages, mais dont la précision reste à améliorer comparativement aux moyens classiques. Cependant, ils donnent de nombreuses informations sur la surface mesurée. Leur emploi commence à s'imposer.

Il existe actuellement plusieurs méthodes de mesure optique (microscope, interférométrie laser, techniques de stéréovision, machines à mesurer tridimensionnelles à capteur laser, etc).

Dans ce travail, on s'intéresse à la caractérisation des états de surface à l'aide de la machine à mesurer tridimensionnelle sans contact (à nappe laser). Il comporte quatre chapitres:

- Chapitre I : Généralités du contrôle dimensionnel où l'on présente brièvement les différentes méthodes de contrôles dimensionnels et géométriques.
- Chapitre II : Caractérisation des états de surface 2D où l'on présente le concept de GPS (Spécification Géométriques des produit), l'analyse des surfaces (défauts de surfaces, paramètres caractéristiques d'états de surface, etc), et les appareils de mesure.
- Chapitre II : Caractérisation des états de surface 3D sans contact où l'on donne plusieurs points : représentation des éléments tolérances et de référence en 3D, intérêt de la caractérisation 3D des états de surface, définitions et éléments constituent la texture d'une surface, mesure de rugosité, caractéristiques d'états de surface 3D, la MMT sans contact utilisée, etc).
- Chapitre IV : Application sur des pièces industrielles : plan, cylindres et sphère. Dans ce chapitre on détermine quelques paramètres d'états de surface à partir du nuage de points obtenus à l'aide de la MMT sans contact sur ces surfaces. Le traitement des ces points nécessite au préalable une optimisation suivant la méthode des moindres carrés des surfaces mesurées.

Comparativement avec les moyens classiques, les résultats obtenus sont acceptables, ce qui montre que la mesure des états de surfaces à l'aide de la MMT sans contact peut recommandée puisqu'elle permet d'évaluer le paramètre d'état de surface considéré sur toute la surface et non seulement sur une ligne, ainsi, on peut avoir une valeur moyenne représentant toute la surface mesurée.

L'étude est encore à développer pour déterminer les paramètres non calculés et d'autres, tels que le taux de portance et ceux définis par les futurs normes.

Bibliographies :

[1] : **FANCHON J.L** : Guide des sciences et technologies industrielles, Dunod, 2004, France.

[2] Centre technique des industries mécaniques : *Manuel des traitements de surfaces à l'usage des bureaux d'études* 1987

[3] **Mac Ferretti** : *Mesure et contrôles industriels*, Dunod 1998 france

[4] **R.Quatremer et J-P.TROTIGNON** : *Précis de construction mécanique (dessin, conception et normalisation)* 12^{ème} édition, 2001, France

[5] **André Chevalier** : *Chevalier guide du dessinateur industriel*. Edition Hachette Technique, 2004

[6] **Michel** : *Caractérisation et mesure des microgéométries de surface*. Technique d'ingénieur, France

[7] **A. Semerdjiev** : *Cours de métrologie*, ENP, 1981/1982

[8] **A. Grandadam** : *Tolérances. Etats de surface*. Techniques d'ingénieur, B1620, 1973, France

[9] **H.GERLING. H.Jacot** : *Techniques de Contrôle Dimensionnel dans l'usinage*, Editions : EYROLLES 1978

[10] **M.BASSIERE et E.GAIGNEBET** : *Métrologie générale*, Editions : Dunod 1966, France

[11] **Pierre Bourdet.Luc.Mathieu** : *Qualité des Produits dans les Entreprises, Tolérancement et Métrologie Dimensionnelle*. Edition CETIM (Centre technique des Industries Mécaniques) 1998.

[12] **D.Mainsch, I.A.Greenwood, D.G.Chtwynd** : *Metrology and Propreties of Engeneering Surfaces*, edition: Kluwer Academic,2001, USA

[13] **Jean-Pierre Gonnet, Jean-François Fontaine, David Joannic** : *Nouvelle approche du contrôle tridimensionnel par mesurage sans contact*, 16ème Congrès Français de Mécanique, 1-5 septembre 2003, France

- [14] **Pierre BOURDET** : contribution à la mesure tridimensionnelle: modèle d'identification géométrique des surfaces, métrologie fonctionnelle des pièces mécaniques, correction géométrique des machines à mesurer tridimensionnelle, 23 juin 1987, France
- [15] **P.PADILLA, B, ANSELMETTI, L. MATHIEU et M. RABOYEAU** : Production mécanique. Dunod, 1986, Paris, France.
- [16] **Pierre BOURDET** : Métrologie tridimensionnelle et géométrie des pièces mécaniques, 1998/1999, France
- [17] **BARKI Mohamed** : Propagation des Incertitudes en Mesure 3D sans Contact, Mémoire magistère, 13 Avril 2008, ENP
- [18] **Bernard RAPHET** : Technique d'Ingénieur États de surface Caractérisation (R1230, R1231)
- [19] **Patrick BOUCHAREINE** : Technique d'ingénieur Métrologie des surfaces (R1390)
- [20] **Marie-Line Zani** : La mesure de rugosité, Quelques normes...et plusieurs dizaines de paramètres, octobre 2003
- [21] **Article** : état de surface, 25 novembre 2004
- [22] www.google.fr/appareils de mesure d'états de surface//appareils à palpeurs
- [23] www.mitutoya.fr/LSM.ALLEG
- [24] [www.google.fr //états](http://www.google.fr/états) de surface// instruments de mesure
- [25] www.gom.com
- [26] <http://www.holo3.com>

TABLE DES ANNEXES :

Annexe I : tolérances et écarts géométriques	I
Annexe II : concept GPS et les normes	II
Annexe III : états de surface	III

ANNEXE I

TOLERANCE ET ECARTS GEOMETRIQUES

A.I.1 Tableau de tolérances géométriques [8]: (d'après NF E 04-552)

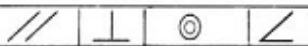
Symboles et caractéristiques à tolérer		Exemples d'indication et d'interprétation			
		Indication sur le dessin	Zone de tolérance	Interprétation	
Tolérances de forme	Éléments isolés	— Rectitude d'une ligne ou d'un axe			L'axe du cylindre dont la cote est reliée au cadre de la tolérance doit être compris dans une zone cylindrique de 0,03 de diamètre.
		□ Planéité d'une surface			La surface tolérancée doit être comprise entre deux plans parallèles distants de 0,05.
		○ Circularité d'un disque, d'un cylindre, d'un cône, etc.			Le pourtour de chaque section droite doit être compris dans une couronne circulaire de largeur 0,02.
		⊘ Cylindricité			La surface considérée doit être comprise entre deux cylindres coaxiaux dont les rayons diffèrent de 0,03.
	Éléments isolés ou associés	⌒ Ferme d'une ligne quelconque (profil ou contour)			Dans chaque section parallèle au plan de la projection, le profil considéré doit être compris entre deux lignes enveloppes des cercles de diamètre 0,04 dont les centres sont situés sur une ligne ayant le profil géométrique correct.
⊂ Ferme d'une surface quelconque				La surface considérée doit être comprise entre deux surfaces enveloppes des sphères de diamètre 0,03 dont les centres sont situés sur une surface ayant la forme géométrique théorique.	
Tolérances d'orientation	Éléments associés	// Parallélisme d'une ligne (axe) ou d'une surface par rapport à une droite de référence ou un plan de référence			L'axe supérieur doit être compris dans une zone cylindrique de diamètre 0,1 parallèle à l'axe inférieur A, droite de référence.
		⊥ Perpendicularité d'une ligne (axe) ou d'une surface par rapport à une droite ou un plan de référence			L'axe du cylindre dont la cote est reliée au cadre de tolérance doit être compris entre deux droites parallèles distantes de 0,05 perpendiculaires au plan de référence et se trouvant dans le plan indiqué sur le dessin.
		∠ Inclinaison d'une ligne (axe) ou d'une surface par rapport à une droite ou un plan de référence			L'axe du trou doit être compris entre deux droites parallèles distantes de 0,1 et formant avec le plan de référence un angle de 60°.
Tolérances de position	Éléments associés	⊕ Localisation de lignes, axes ou surfaces entre eux ou par rapport à un ou plusieurs éléments			L'axe du trou doit être compris dans une zone cylindrique d'un diamètre de 0,05 dont l'axe est dans la position théorique spécifique de la ligne.
		◎ Coaxialité (concentricité) d'un axe ou d'un point par rapport à un axe ou un point de référence			L'axe du cylindre dont la cote est reliée au cadre de tolérance doit être compris dans une zone cylindrique de diamètre 0,03 coaxiale à l'axe commun de référence A.
Tolérances de battement	Éléments associés	↗ Battement simple d'un élément sur l'axe de révolution			Le battement simple radial ne doit pas dépasser 0,02 dans chaque plan de mesure pendant une révolution complète autour de l'axe de référence A-B.
		↗ Battement total d'un élément sur l'axe de révolution			Le battement total radial ne doit pas dépasser 0,1 en chaque point de la surface spécifiée durant plusieurs révolutions autour de l'axe de référence A-B et avec un mouvement axial relatif entre la pièce et l'instrument de mesure. Le mouvement doit être guidé le long d'une ligne de contour de forme théoriquement parfaite, étant en position correcte par rapport à l'axe de référence.

A.I.2 Dableau de valeurs des tolérances fondamentales en μm en fonction des dimensions en mm [7]

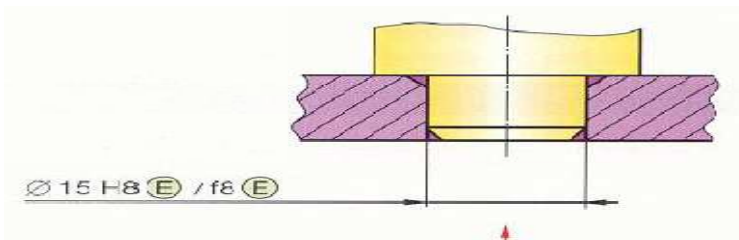
Dimension	Qualité IT																	
	01	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14 (1)	15 (1)	16 (1)
≈ 3	0,3	0,5	0,8	1,2	2	3	4	6	10	14	25	40	60	100	140	250	400	600
> 3 à 6	0,4	0,6	1	1,5	2,5	4	5	8	12	18	30	48	75	120	180	300	480	750
> 6 à 10	0,4	0,6	1	1,5	2,5	4	6	9	15	22	36	58	90	150	220	360	580	900
> 10 à 18	0,5	0,8	1,2	2	3	5	8	11	18	27	43	70	110	180	270	430	700	1 100
> 18 à 30	0,6	1	1,5	2,5	4	6	9	13	21	33	52	84	130	210	330	520	840	1 300
> 30 à 50	0,6	1	1,5	2,5	4	7	11	16	25	39	62	100	160	250	390	620	1 000	1 600
> 50 à 80	0,8	1,2	2	3	5	8	13	19	30	46	74	120	190	300	460	740	1 200	1 900
> 80 à 120	1	1,5	2,5	4	6	10	15	22	35	54	87	140	220	350	540	870	1 400	2 200
> 120 à 180	1,2	2	3,5	5	8	12	18	25	40	63	100	160	250	400	630	1 000	1 600	2 500
> 180 à 250	2	3	4,5	7	10	14	20	29	46	72	115	185	290	460	720	1 150	1 850	2 900
> 250 à 315	2,5	4	6	8	12	16	23	32	52	81	130	210	320	520	810	1 300	2 100	3 200
> 315 à 400	3	5	7	9	13	18	25	36	57	89	140	230	360	570	890	1 400	2 300	3 600
> 400 à 500	4	6	8	10	15	20	27	40	63	97	155	250	400	630	970	1 550	2 500	4 000
> 500 à 630								44	70	110	175	280	440	700	1 100	1 750	2 800	4 400
> 630 à 800								50	80	125	200	320	500	800	1 250	2 000	3 200	5 000
> 800 à 1 000								56	90	140	230	360	560	900	1 400	2 300	3 600	5 600
> 1 000 à 1 250								66	105	165	260	420	660	1 050	1 650	2 600	4 200	6 600
> 1 250 à 1 600								78	125	195	310	500	780	1 250	1 950	3 100	5 000	7 800
> 1 600 à 2 000								92	150	230	370	600	920	1 500	2 300	3 700	6 000	9 200
> 2 000 à 2 500								110	175	280	440	700	1 100	1 750	2 800	4 400	7 000	11 000
> 2 500 à 3 150								135	210	330	540	860	1 350	2 100	3 300	5 400	8 600	13 500

(1) Les qualités 14 à 16 ne sont prévues qu'au-delà de 1 mm.

A.I.3 Qualité dimensionnelle, écarts géométriques et rugosité obtenus avec différents procédés d'élaboration des pièces :

Dimensions	Fonction des surfaces.....	sans contact	contact fixe	centrage contact mobile guidage	étanchéité trajectoire précise	Abréviations	Écarts géométriques (mm)							
	Nature des surfaces	brute	précision moyenne	bonne précision	haute précision									
	Qualité IT	16-15-14-13-12	11-10-9	8-7-6	5-4-3-2-1-0-01									
Rugosité	Aspect.....	terne		gris acier	brillant	glacé								
	Anciens signes de façonnage.....	~	▽	▽▽	▽▽▽									
	Qualité	grossière		moyenne	fine	très fine								
	N° classe (ISO 1302).....	N11	N10	N9	N8	N7		N6	N5	N4	N3	N2	N1	
	R (µm)	120	63	25	12	6,3		3,2	1,6	0,8	0,4	0,2	0,1	0,05
	Ra (µm).....	25	12,5	6,3	3,2	1,6		0,8	0,4	0,2	0,1	0,05	0,025	
moulage au sable.....	[Barres noires]					mos								
moulage cire perdue shaw.....	[Barres noires]													
moulage moule métallique.....	[Barres noires]					mo								
moulage sous pression.....	[Barres noires]													
matricage à chaud.....	[Barres noires]					ma								
laminage filage extrusion à chaud.....	[Barres noires]					lac								
laminage tréfilage extrusion à froid.....	[Barres noires]					laf								
sciage.....	[Barres noires]					sc								
oxycoupage.....	[Barres noires]													
frittage.....	[Barres noires]						0,02		0,02					
rabotage.....	[Barres noires]					rb	0,05	0,1			0,1			
fraisage acier rapide.....	[Barres noires]					fr	0,05-0,01	0,03	0,005-0,02	0,01				
fraisage carbure.....	[Barres noires]						0,02-0,01	0,02		0,01				
tournage ébauche.....	[Barres noires]													
tournage finition.....	[Barres noires]					to	0,02-0,01	0,02	0,005-0,01	0,01				
tournage outil diamant carbure.....	[Barres noires]						0,01	0,02	0,01	0,01				
perçage au foret.....	[Barres noires]					pe	0,2	0,1	0,1	0,1				
alésage à l'outil.....	[Barres noires]						0,005	0,01	0,01	0,01				
alésage à l'alésoir.....	[Barres noires]					al								
alésage outil diamant carbure.....	[Barres noires]													
brochage.....	[Barres noires]					br	0,002		0,002					
taillage.....	[Barres noires]													

A.1.4 la cote noté E



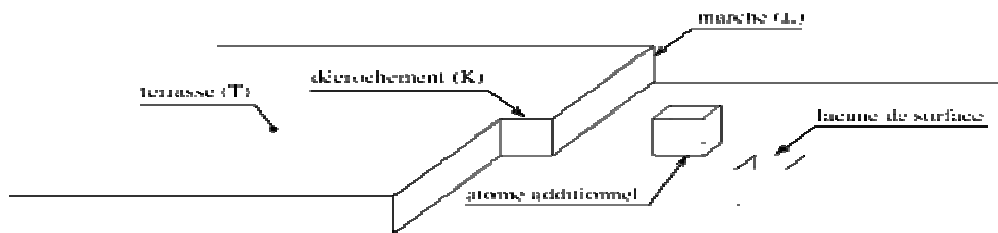
Ce symbole signifie que l'enveloppe de forme parfaite à la dimension au maximum de matière ne doit pas être dépassée.

A.1.5 Modèle TMK : est un modèle de représentation d'une surface et des défauts à l'échelle atomique.

T :Terrace(en anglais) s'égneifie une partie plane

M :Ledge s'égneifie les crêtes,étagés

K :Kink s'égneifie décrochement dans une marche



« representation du modèle TMK »

ANNEXE II

CONCEPT GPS ET LES NORMES

A.II.1 Matrice GPS [18]

N°de la maille	1	2	3	4	5	6
Caractéristique géométrique de l'élément	Indication dans la documentation du produit – Codification	Définition des tolérances – Définitions théoriques et valeurs	Définition des caractéristiques ou paramètres de l'élément extrait	Évaluation des écarts – Comparaison avec les limites de la tolérance	Exigences pour l'équipement de mesure	Exigences d'étalonnage – Étalons d'étalonnage

✓ **Maillon 1** : Indication dans la documentation du produit – Codification.

Ce maillon regroupe les normes traitant la façon d'indiquer, sur le dessin, les caractéristiques de la pièce.

✓ **Maillon 2** : Définition des tolérances – Définition théorique et valeurs.

Ces normes fixent les règles permettant de traduire le code en valeurs exprimées en unités SI. Ce maillon traite aussi de la façon de déterminer la caractéristique à partir de la géométrie.

✓ **Maillon 3** : Définitions des caractéristiques ou paramètres de l'élément extrait.

Ce maillon définit les caractéristiques de l'élément extrait ; celui-ci est obtenu à partir d'un ensemble de points prélevés sur la surface de la pièce.

✓ **Maillon 4** : Évaluation des écarts de la pièce – Comparaison avec les limites de la tolérance.

Ces normes spécifient la méthode pour comparer les résultats de mesure aux limites de tolérance, pour décider de la conformité ou non de la pièce aux spécifications du dessin, en tenant compte de l'incertitude de mesure.

✓ **Maillon 5** : Exigences pour l'équipement de mesure.

Ces normes décrivent les équipements de mesure. Elles définissent les caractéristiques qui influencent l'incertitude de mesure. Elles peuvent fixer les erreurs maximales pour les caractéristiques définies.

✓ **Maillon 6** : Exigences d'étalonnage – Étalon d'étalonnage.

Ces normes décrivent les étalons d'étalonnage et les procédures d'étalonnage à utiliser pour vérifier les exigences fonctionnelles d'équipement de mesure du maillon 5, et d'assurer la traçabilité à la définition de l'unité SI concernée.

A.II.2 Normes ISO :sont des normes international , ont etés révisées et crée entre 1996 et 2002

leurs adoption par les pays européennes d'ate de 1997 .

D'après la matrice de GPS les normes d'état de surface sont résumées dans ce tableau [18]:

N° de la maille	1	2	3	4	5	6
Caractéristique géométrique de l'élément	Indication dans la documentation du produit – Codification	Définition des tolérances – Définitions théoriques et valeurs	Définition des caractéristiques ou paramètres de l'élément extrait	Évaluation des écarts – Comparaison avec les limites de la tolérance	Exigences pour l'équipement de mesure	Exigences d'étalonnage – Étalons d'étalonnage
Profil de rugosité	NF EN ISO 1302	NF EN ISO 4287 NF EN ISO 11562 NF EN ISO 12085 NF EN ISO 13565-1 NF EN ISO 13565-2 NF EN ISO 13565-3	NF EN ISO 4288 NF EN ISO 11562 NF EN ISO 12085 NF EN ISO 13565-2	NF EN ISO 4288 NF EN ISO 12085	NF EN ISO 3274 NF EN ISO 11562	NF EN ISO 5436-1 NF EN ISO 5436-2 NF EN ISO 12179
Profil d'ondulation	NF EN ISO 1302	NF EN ISO 4287 NF EN ISO 11562 NF EN ISO 12085	NF EN ISO 11562 NF EN ISO 12085	NF EN ISO 4288 NF EN ISO 12085	NF EN ISO 3274 NF EN ISO 11562	NF EN ISO 5436-1 NF EN ISO 5436-2 NF EN ISO 12179
Profil primaire	NF EN ISO 1302	NF EN ISO 4287 NF EN ISO 11562	NF EN ISO 4288		NF EN ISO 3274 NF EN ISO 11562	
Imperfections de surface	NF EN ISO 8785	NF EN ISO 8785				

A.II.3. Surface de Bézier

La surface de Bézier est l'ensemble des **courbes de Bézier** qui sont des courbes polynomiales paramétriques décrites pour la première fois en 1962 par l'ingénieur français Pierre Bézier qui les utilisa pour concevoir des pièces d'automobiles à l'aide d'ordinateurs. Elles ont de nombreuses applications dans la synthèse d'images et le rendu de fontes.



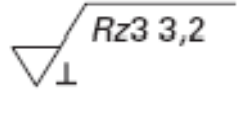
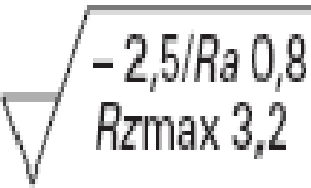
Les **surfaces** de Bézier sont des cas particuliers de **surfaces** splines et se généralisent en les **surfaces** de; Bézier rationnelles. ... **surface** suivante **surface** précédente courbes 2D courbes 3D **surfaces** fractals polyèdres...(www.google.fr//surface de Bézier)

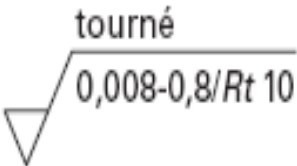
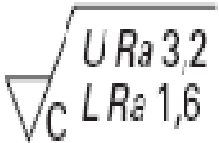
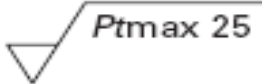

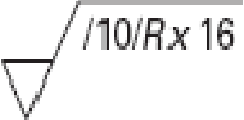
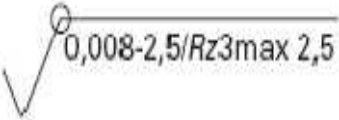
ANNEXE III

ETATS DE SURFACE

A.III.1 Spécification d'états de surface [18]

Selon la norme GPS générale NF EN 1302 en 2002

Indications	Exigences ou interprétations
	<p>Enlèvement de matière obligatoire</p> <ul style="list-style-type: none"> ● Limite de spécification supérieure pour le paramètre Ra : 0,8 μm ● Règle pour comparer les valeurs mesurées à la limite spécifiée, par défaut, règle des 16 % ● Bande de transmission ● Longueur d'évaluation, par défaut, 5 longueurs de base ● Stries de surface, pas d'exigence
	<p>Enlèvement de matière interdit</p> <ul style="list-style-type: none"> ● Limite de spécification inférieure pour le paramètre Ra : 0,8 μm ● Règle pour comparer les valeurs mesurées à la limite spécifiée, par défaut, règle des 16 % ● Bande de transmission ● Longueur d'évaluation, par défaut, 5 longueurs de base ● Stries de surface, pas d'exigence
	<p>Enlèvement de matière obligatoire</p> <ul style="list-style-type: none"> ● Limite de spécification supérieure pour le paramètre Rz : 3,2 μm ● Règle pour comparer les valeurs mesurées à la limite spécifiée, par défaut, règle des 16 % ● Bande de transmission ● Longueur d'évaluation : 3 longueurs de base ● Stries de surface, à peu près perpendiculaires au plan de projection
	<p>Enlèvement de matière obligatoire</p> <ul style="list-style-type: none"> ● Deux limites de spécification : <ul style="list-style-type: none"> ✓ limite de spécification supérieure pour le paramètre Ra : 0,8 μm <ul style="list-style-type: none"> ▪ règle pour comparer les valeurs mesurées à la limite spécifiée, par défaut, règle des 16 % ▪ bande de transmission, $\lambda_s =$ par défaut et $\lambda_c = 2,5$ mm ▪ longueur d'évaluation, par défaut, 5 longueurs de base ✓ limite de spécification supérieure pour le paramètre Rz : 3,2 μm <ul style="list-style-type: none"> ▪ règle de la valeur maximale ▪ bande de transmission ▪ longueur d'évaluation, par défaut, 5 longueurs de base ● Stries de surface, pas d'exigence


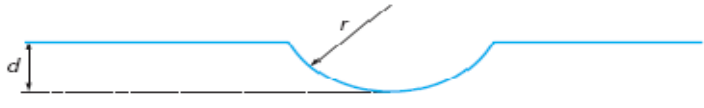
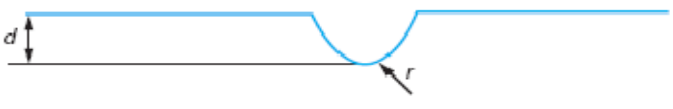
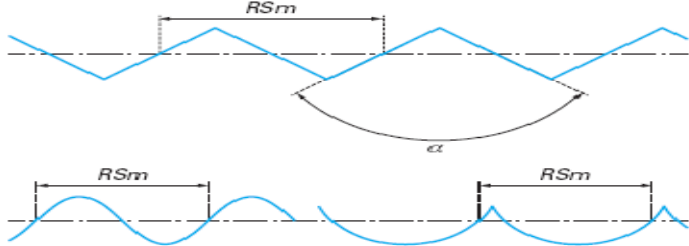
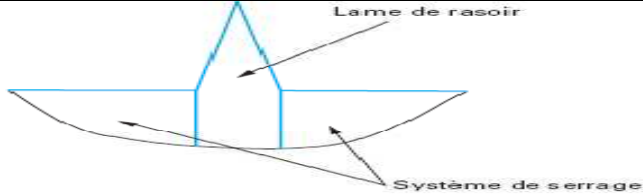
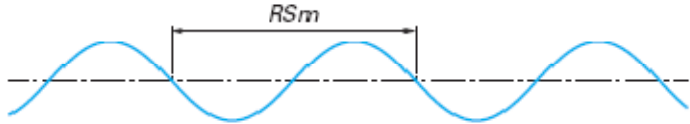
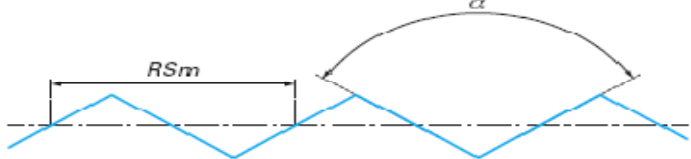
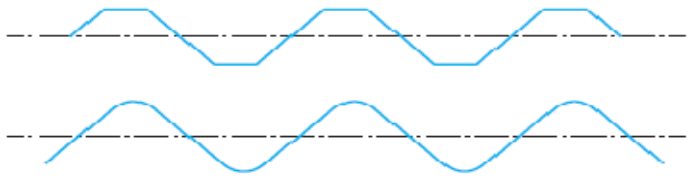
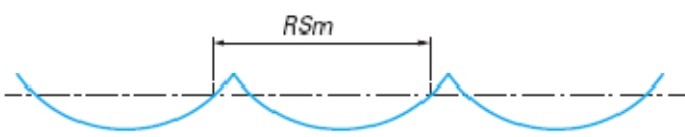
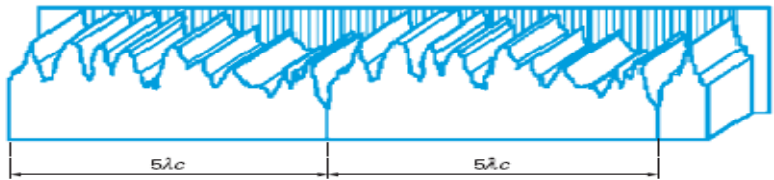
	<p>Enlèvement de matière obligatoire</p> <ul style="list-style-type: none"> ● Procédé de fabrication, tournage ● Limite de spécification supérieure pour le paramètre Rt : 10 μm ● Règle pour comparer les valeurs mesurées à la limite spécifiée, par défaut, règle des 16 % ● Bande de transmission, $\lambda_s = 0,008$ mm et $\lambda_c = 0,8$ mm ● Longueur d'évaluation, par défaut, 5 longueurs de base ● Stries de surface, pas d'exigence
	<p>Enlèvement de matière obligatoire</p> <ul style="list-style-type: none"> ● Limite de spécification supérieure pour le paramètre Ra : 3,2 μm ● Limite de spécification inférieure pour le paramètre Ra : 1,6 μm ● Règle pour comparer les valeurs mesurées à la limite spécifiée, par défaut, règle des 16 % ● Bande de transmission ● Longueur d'évaluation, par défaut, 5 longueurs de base ● Stries de surface, à peu près circulaires par rapport au centre
	<p>N'importe quel procédé de fabrication</p> <ul style="list-style-type: none"> ● Limite de spécification supérieure pour le paramètre Pt : 25 μm ● « Règle de la valeur maximale » ● Bande de transmission ● Longueur d'évaluation, par défaut, longueur de l'élément ● Stries de surface, pas d'exigence
	<p>Enlèvement de matière obligatoire</p> <ul style="list-style-type: none"> ● Limite de spécification supérieure pour le paramètre R : 10 μm ● Règle pour comparer les valeurs mesurées à la limite spécifiée, par défaut, règle des 16 % ● Bande de transmission ● Longueur d'évaluation, par défaut 16 mm ● Stries de surface, pas d'exigence
	<p>Enlèvement de matière obligatoire</p> <ul style="list-style-type: none"> ● Limite de spécification supérieure pour le paramètre Rx : 16 μm ● Règle pour comparer les valeurs mesurées à la limite spécifiée, par défaut, règle des 16 % ● Bande de transmission ● Longueur d'évaluation : 10 mm ● Stries de surface, pas d'exigence
	<p>N'importe quel procédé de fabrication</p> <ul style="list-style-type: none"> ● Exigence de surface valable à toutes les surfaces du contour fermé de la vue en projection ● Limite de spécification supérieure pour le paramètre Rz : 2,5 μm ● Règle de la valeur maximale ● Bande de transmission : $\lambda_s = 0,008$ mm et $\lambda_c = 2,5$ mm ● Longueur d'évaluation : $3 \times 2,5$ mm

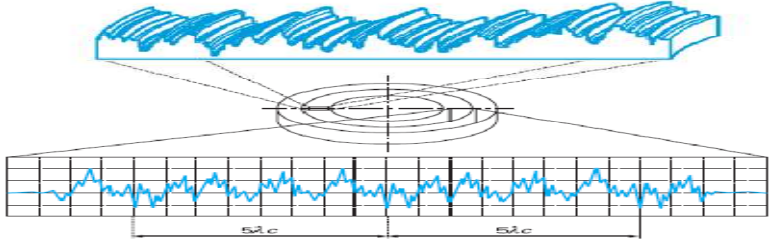

	<ul style="list-style-type: none"> • Stries de surface, pas d'exigence
--	---

A.III.2 Symboles à utiliser pour préciser l'orientation des stries [19] :

Symbole graphique	Interprétation
=	Parallèle au plan de projection de la vue sur laquelle le symbole figure
⊥	Perpendiculaire au plan de projection de la vue sur laquelle le symbole figure
X	Croisé dans deux directions obliques par rapport au plan de projection de la vue sur laquelle le symbole figure
M	Multidirectionnel
C	Approximativement circulaire par rapport au centre de la surface à laquelle le symbole s'applique
R	Approximativement radial par rapport au centre de la surface à laquelle le symbole s'applique
P	Stries particulières, non directionnelles ou protubérantes

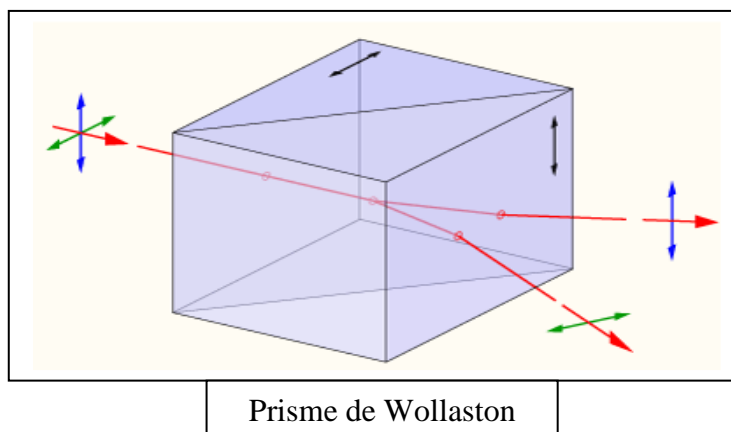
A.III.3 Les différents étalons :

Descriptions	Dessins
Rainures larges à fond plat	
Rainures larges à fond arrondi	
Rainure étroite à fond arrondi	
2 réseaux de rainures de valeur Ra identique avec 2 profils différents, l'un sensible et l'autre non sensible aux dimensions de la pointe du palpeur	
Fine arête protubérante : En pratique, on utilise une lame de rasoir non revêtue. La largeur de l'arête est d'environ $0,1\mu\text{m}$.	
Rainures à profil sinusoïdal	
Rainures à profil en triangle isocèle	
Rainures sinusoïdales simulées	
Rainures à profil en arcs de cercle	
Profils unidirectionnels irréguliers	

Profils circulaires irréguliers	
Prisme de précision	

A.III.4 Prisme de Wollaston :

Le prisme de Wollaston est un instrument optique, inventé par William Hyde Wollaston, il transforme un faisceau de lumière non polarisée en deux faisceaux de directions différentes et de polarisations linéaires orthogonales entre elles.



Il est constitué de deux prismes de calcite ou quartz accolés, dont les axes optiques sont orthogonaux entre eux. (www.google.fr//optique)

A.III.5 Le microscope à effet tunnel

Le microscope à effet tunnel (en anglais STM, Scanning Tunneling Microscope) fut inventé en 1981 par des chercheurs d'IBM, Gerd Binnig et Heinrich Rohrer, qui reçurent le Prix Nobel de physique pour cette invention en 1986. C'est un microscope en champ proche. Le microscope à effet tunnel utilise un phénomène quantique, l'effet tunnel, pour déterminer la morphologie et la densité d'états de surfaces. [17]

A.III.6 La force de Vander Waals :

Une liaison de van der Waals est une interaction électrique de faible intensité entre atomes, molécules, ou entre une molécule et un cristal. Bien qu'il soit possible de décrire sommairement cette interaction en considérant les forces électriques qui sont présentes entre tous les couples de charges électriques qui forment ces atomes et ces molécules en définitive, c'est un phénomène qui ne peut bien se comprendre que dans le cadre de la physique quantique.

Les forces de Van der Waals ont plusieurs origines. On dénombre trois effets :

- Les forces de Keesom ou effets d'orientation.
- Les forces de Debye ou effets d'induction.
- Les forces de London ou effets de dispersion

A.III.7 Frange li mineuse :

Frangé li mineuse est une méthode de mesure direct à condition que les démentions de la pièce ne sont pas grandes, pour la prise d'empreinte c'est la mesure indirect. (www.google.fr/ optique)

A.III.8 L'élément géométrique des moindres carrés :

La méthode des moindres carrés, indépendamment élaborée par Legendre en 1805 et Gauss en 1809, permet de comparer des données expérimentales, généralement entachées d'erreurs de mesure à un modèle mathématique censé décrire ces données. (www.google.fr/ mathématique appliquée)

A.III.9 Caractéristiques d'états de surface

Les paramètres	Paramètres 2D (normes ISO 4287,13565-1 et 2)	Paramètres surfaciques (ISO 25178)
	Ra, Pa, Wa (écart moyen arithmétique du profil)	Sa (rugosité moyenne arithmétique de la surface)
	Rq, Pq, Wq (écart moyen quadratique de profil)	Sq (rugosité moyenne quadratique de la surface)
	Rsk, Psk, Wsk	Ssk

Paramètres d'amplitude	(facteur d'asymétrie du profil)	(facteur d'asymétrie de la surface)
	Rku, Pku, Wku (facteur d'aplatissement du profil)	Sku (facteur d'aplatissement de la surface)
	Rp, Pp, Wp (hauteur maximale de saillie du profil)	Sp (Hauteur maximale des pics)
	Rv, Pv, Wv (profondeur maximale de creux du profil)	Sv (profondeur maximale des creux)
	Rt, Pt, Wt (hauteur totale du profil)	St (Remplacé par Sz)
	Rz (hauteur maximale du profil)	Sz (hauteur maximale de la surface, du plus haut point à la plus profonde vallée)
	RC (hauteur moyenne des éléments du profil)	Pas d'équivalent
	Rsm (largeur moyenne des éléments du profil)	Pas d'équivalent
	Rdq (pente moyenne du profil)	Sdq (pente moyenne de la surface)
Paramètres de Taux de portance	Rmr, Pmr, Wmr (taux de longueur portante du profil)	Smr (taux de surface portante)
	Rdc, Pdc, Wdc (différence de hauteur de coupe du profil)	Sdc (différence de hauteur de surface portante)
	Pas d'équivalent	Smc (hauteur de taux de surface)

		portante)
Paramètres d'isotropie	Pas d'équivalent	Str (rapport d'aspect de la texture de surface)
	Pas d'équivalent	Sal (longueur d'auto corrélation de la surface)
	Pas d'équivalent	Std (direction de texture de la surface)
Paramètres fonctionnels	Rk, Rpk, Rvk	Sk, Spk, Svk
	Pas d'équivalent	Vmp, Vmc, Vvc, Vvv (paramètres de volume)

A.III.10 MMT :

Les machines à mesurer tridimensionnelles (MMT) sont nées au début des années soixante et se sont vraiment développées après l'invention du palpeur à déclenchement en 1970. Les principaux concepts qui régissent la mise en œuvre et l'exploitation de ces machines sont en place depuis le début des années quatre-vingt. (Métrologie et Appareils de mesure, auteur : **Frija Mounir, 2004, Sousse**)