

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

Ecole Nationale Polytechnique



المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
Ecole Nationale Polytechnique

Département de Génie Mécanique

Mémoire de Fin d'Etudes
Pour l'obtention du diplôme d'Ingénieur d'Etat en

Génie Mécanique

**Évaluation des paramètres d'état de
surface en utilisant le fichier de mesure
à l'aide du Rugosoft 10G**

Proposé et dirigé par :

Dr. BOUAZIZ Mohamed

Réalisé par :

M. DEBBA Adel

Juin 2010

Ecole Nationale Polytechnique 10, Avenue Hassen Badi, El-Harrach, ALGER

Dédicaces

A ceux qui n'ont jamais cessé de m'encourager et de me

soutenir,

A ceux qui leur amour m'a donné la volonté d'aller

toujours de l'avant,

A mes très chers parents, qu'Allah les protège

A mes frères et sœurs

A toute ma famille et tous mes amis

Je dédie ce travail

.Adel

Remerciements

Je remercie avant tout Allah le tout puissant pour m'avoir donné la foi, la volonté et le courage de mener à bien ce modeste travail.

Mes sincères remerciements à mon promoteur Monsieur BOUAZIZ Mohamed, pour m'avoir conseillé, dirigé pendant la réalisation de ce travail.

Mes remerciements vont aussi aux messieurs les membres du jury d'avoir pris le temps et le soin de lire ce rapport.

Merci à tous les enseignants et à tous ceux qui ont contribué, de près ou de loin à ma formation.

Je tiens également à remercier tous mes amis et mes camarades de la promotion, et tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la bonne réalisation de ce travail.

ملخص :

الهدف من هذه الدراسة هو تقييم خصائص حالة السطح و ذلك بالاستعانة بملف رقمي تحصلنا عليه عن طريق جهاز قياس حالة السطح ريجسوفت ج10, وقد تمكنا في هذه الدراسة من حساب جميع الخصائص المشار في الجهاز وكذلك حساب الخصائص الأخرى الغير مشار إليها في الجهاز وذلك حسب المقاييس الدولية ايزو 4287 و 4288. الحساب تم عن طريق برنامج ماتلاب

كلمات مفتاحية :

حالة السطح, خشونة, جهاز قياس عن طريق الملامسة, خصائص حالة السطح

Résumé :

Notre objectif dans ce travail est d'exploiter le fichier de mesure obtenu avec l'appareil TESA Rugosurf 10G pour calculer les différents paramètres d'état de surface indiqués par l'appareil suivant les normes ISO 4287 et ISO 4288, et de déterminer d'autres paramètres non indiqués par l'appareil mais qui sont définis par la norme utilisée ou par des projets de norme. Le calcul s'effectue en programmation Matlab.

Les mots clés :

Rugosité, état de surface, rugosimètre, paramètres d'état de surface, Rugosurf 10G

Abstract:

Our goal in this subject is to use the data obtained with the measuring device TESA Rugosurf 10G to calculate the different parameters of surface state reported by the device according to the standards ISO 4287 and ISO 4288, and determining other parameters not indicated by the device but they are defined by the standard used by or draft standards. The calculation is done by Matlab programming.

Key words:

Parameters of surface, roughness, TESA Rugosurf 10G, surface condition

SOMMAIRE

Liste des figures	i
Liste des tableaux	iii
Introduction générale.....	1

Chapitre 1 Généralité sur les techniques de mesure

I. Définition de la métrologie	3
I.1. Place de la métrologie parmi les sciences	3
I.2. Importance de la métrologie dans l'industrie.....	4
I.3. contrôle dimensionnel	4
II. Tolérances :.....	6
II.1. Types et désignations des tolérances :	6
II.1.2. Tolérance géométrique :	7
II.1.3. Spécification de l'état de surface	7
II.2. Principes de cotation :	9
III. Conclusion :	9

Chapitre 2: Caractérisation des états de surface

I. Introduction.....	10
II. Concept GPS et normes d'état de surface :	11
II.1. Normes d'état de surface :	11
II.1.1 la Norme ISO 4287	12
II.1.2 la Norme ISO 25178.....	12
III. Différents écarts géométriques de l'état de surface.....	13
III.1. Types des défauts	13
III.1.1. Ordre 1 : Ecart de forme	13
III.1.2. Ordre 2 : Ecart d'ondulation	14
III.1.3. Ordre 3 : Ecart de rugosité périodique (Stries , sillons).....	14
III.1.4. Ordre 4 : Ecart de rugosité apériodique (Arrachements, fentes, piqûres).....	15
IV. Analyse d'une surface :	15
IV.1. Filtre de profil	16
IV.1.1 filtre de profil λs	16
IV.1.2. filtre de profil λc	16
IV.1.3. filtre de profil λf	16
IV.2. Etude de profil :	17

IV.2.1 .Les différents Types de Profils (ISO 3274).....	17
IV.2.1.1.Le Profil Brut	17
IV.2.1.2.Le Profil Primaire.....	18
IV.2.1.3.Le Profil de Rugosité.....	18
IV.2.1.4.Le Profil d'ondulation	18
IV.2.2. Caractéristiques d'états d'une surface réelle	19
IV.3. Méthode d'élaboration et mesure des caractéristiques d'états de surface:.....	19
IV.3.1 Méthode de la ligne moyenne:	20
IV.3.2 Méthode de la ligne enveloppée supérieure:	20
IV.3.3 Méthode de la courbe de portance:.....	20
V. Conclusion.....	21

Chapitre 3: Appareils de mesure d'état de surface

I. Introduction.....	22
I. La méthode Viso-tactile.....	22
III. les appareils à palpeur	23
III.1. Procédure :.....	24
III.2. L'appareil TESA Rugosurf 10G :.....	25
III.3. l'étalonnage du palpeur :	27
IV. Les appareils optiques :.....	28
IV.1. principe :.....	28
IV.2. Palpeurs optiques différentiels :	29
IV.3. Détermination de la rugosité par les microscopies :.....	29
IV.3.1. microscopes à effet tunnel :.....	29
IV.3.2.Microscope à balayage laser :	30
IV. Conclusion	31

Chapitre 4 : Paramètres d'état de surface

I. Introduction.....	32
II. Paramètres d'état de surface 2D	32
II.1. Définitions des Paramètres relatifs à la Norme ISO 4287	33
II.1.1.Paramètres d'amplitude (saillie et creux)	34
II.1.2. Paramètres d'amplitude (moyenne des ordonnées)	36
II.1.3. Paramètres d'espacement	37
II.1.4. Paramètres hybrides.....	38
II.1.5. Courbes et paramètres associés.....	38

II.2. Paramètres définis par rapport à la courbe de portance	41
II.3. Paramètres définis par rapport aux motifs	42
II.3.1. Définition des termes	42
II.3.2. Définition des paramètres liés aux motifs.....	43
III. Paramètres surfaciques 3D d'états de surface.....	44
III.1. Généralités.....	44
III.2. Paramètres de hauteur	44
III.3. Paramètres spatiaux.....	45
III.4. Paramètres hybrides	45
III.5. Paramètres fonctionnels	45
III.6. Paramètres liés à la segmentation.....	46
IV. Estimation des paramètres	47
IV.1 Paramètres définis sur la longueur de base	47
IV.1.1 Estimateur d'un paramètre.....	47
IV.1.2. Estimateur moyen d'un paramètre	47
IV.2 Paramètres définis sur la longueur d'évaluation.....	47
IV.3. Courbes et paramètres associés	47
V. Conclusion.....	47

Chapitre 5 : Mesurage et résultats

I. But :	49
II. Les conditions de mesure	49
III. Réglage de l'appareil.....	49
IV. Mesure des paramètres du profil de rugosité	52
IV.1. Principe de mesurage	52
IV.2. Affichage des résultats de mesure.....	53
IV.3. Résultats de mesurage	54
IV.3.1. Profil primaire	54
IV.3.2. Profil de la rugosité	55
IV.3.3. Courbe de taux de longueur portante Rmr	56
IV.3.4. Courbe de distribution d'amplitude.....	57
V. Résultats du programme de calcul et interprétations :	57
V.1. Profil primaire :	57
V.1.1. Paramètres d'amplitudes (saillie et creux) :	58
V.1.2. Paramètres d'amplitude (moyenne des ordonnées)	59
V.1.4. Paramètres d'espacement Psm :	60

V.1.5. Courbes et paramètres associés	60
V.2. Calcul les paramètres du profil de rugosité	62
V.2.1. Paramètres d'amplitude (saillie et creux) :	62
V.2.2. Paramètres d'amplitude (moyenne des ordonnées) :	63
V.2.3. Paramètres d'espacement	64
V.2.4. Paramètres hybrides.....	64
V.2.5. Courbes et paramètres associés :	65
V.2.6. Courbe de distribution d'amplitude :	67
V.3. Paramètres définis par rapport aux motifs :	67
V.4. Récapitulatif des résultats :	68
V.5. Comparaison.....	69
VI. Conclusion	70
Conclusion générale.....	71
Références bibliographiques	72

Liste des figures

Figure (1.1) : Spécification de l'état de surface	8
Figure (2.1) Relevé d'un profil d'état de surface.....	10
Figure (2.2) : Ecart de forme.....	14
Figure (2.3) : Ecart d'ondulation.....	14
Figure (2.4) : Ecart de rugosité périodique.....	15
Figure (2.5) : Ecart de rugosité aperiodique.....	15
Figure (2.6) : caractéristiques et transmission des profils de rugosité et d'ondulation.....	17
Figure (2.7) : profil de surface	17
Figure (3.1). Représentation schématique d'un appareil à palpeur.....	24
Figure (3.2). Déplacement de point de palpeur.....	25
Figure (3.3). l'appareil TESA Rugosurf 10G.....	26
Figure (3.4). Etalons des rugosimètres.....	27
Figure (3.5).Microscope interférentiel à polarisation pour l'étude de la rugosité.....	28
Figure (3.6). Microscope à effet tunnel.....	30
Figure (3.7). Dispositif à laser pour contrôler la rectitude d'un miroir.....	31
Figure (4.1) Longueur d'ondulation "L" d'un profil comportant cinq longueurs de base "l (cut-off).....	33
Figure (4. 2) hauteur maximale de saillie des profils.....	34
Figure (4.3) Profondeur maximale de creux du profil.....	34
Figure (4.4) : hauteur maximale du profil.....	35
Figure (4.5) : hauteurs moyennes des éléments du profil.....	36
Figure (4.6) : Largeur des éléments du profil.....	38
Figure (4.7) : courbe du taux de longueur portante.....	39
Figure (4.8) Taux de longueur portante relatif.....	40
Figure (4.9) Courbe de distribution d'amplitude.....	40
Figure (4.10) : motif de rugosité.....	43
Figure (4.11) : motif d'ondulation.....	43
Figure (4.12) : Paramètres de rugosité définis par rapport aux motifs.....	44
Figure (5.1) : sélection de la longueur de cut-off.....	50
Figure (5.2) : sélection de nombre du cut-off.....	50
Figure (5.3) : Choix de spécimen d'étalonnage.....	51
Figure (5.4) : opération d'étalonnage dans le labo de métrologie.....	54
Figure (5.5) Principe de mesurage.....	53
Figure (5.6) : interface de rugosoft 10.....	53
Figure (5.7) : Profil primaire suivant la norme ISO 4287.....	54
Figure (5.8) : Profil du rugosité suivant la norme ISO 4287.....	55
Figure (5.9) : courbe de longueur portante Rmr (courbe d'Abbott Fierestone).....	56
Figure (5.10) : Courbe de distribution d'amplitude.....	57
Figure (5.11) : Représentation graphique du profil primaire (P).....	58

Figure (5.12) : Taux de longueur portante Pmr.....	61
Figure (5.13) : Représentation graphique du profil de rugosité.....	62
Figure (5.14) : Courbe d'Abbott Firestone (%Rmr).....	66
Figure (5.15) : Distribution des ordonnées du profil de rugosité.....	67

Liste des tableaux

Tableau (3.1) : paramètres mesurés par TESA Rugosurf 10G.....	27
Tableau (4.1) Définition des paramètres liés à la courbe de portance.....	41
Tableau (4.2) : paramètre surfacique de hauteur 3D.....	45
Tableau (4.3) : paramètre surfacique spatiaux 3D.....	45
Tableau (4.4) paramètre surfacique hybrides 3D.....	45
Tableau (4.5) : paramètre surfacique fonctionnels 3D.....	46
Tableau (4.6) : paramètre surfacique liés à la segmentation 3D.....	46
Tableau (5.1) paramètres P suivant ISO 4287.....	54
Tableau (5.2) : paramètres R suivant la norme ISO 4287.....	55
Tableau (5.3) : paramètres de rugosité de base R3z suivant la norme DIN/DB(Daimler Benz) N31007.....	56
Tableau (5.4) : paramètres mesurés par rapport aux courbe de portance suivant la norme ISO 13565 R/Jis B0671.....	56
Tableau (5.5) : Paramètres P d'amplitude (saillie et creux).....	58
Tableau (5.6) : paramètres d'amplitude (moyenne des ordonnées).....	59
Tableau (5.7) : Pmr en fonction de niveau de coupe c.....	60
Tableau (5.8) : Paramètres d'amplitude (saillie et creux).....	62
Tableau (5.9) : Paramètres d'amplitude (moyenne des ordonnées).....	63
Tableau (5.10) : les valeurs des Paramètres d'espacement.....	64
Tableau (5.11) les valeurs de $R\Delta q$ dans chaque longueur de base.....	65
Tableau (5.12) : MI et le taux Rmr en fonction de niveau de coupe.....	65
Tableau (5.13) : Paramètres calculés par rapport à la ligne moyenne.....	68
Tableau (5.14) : Comparaison entre les paramètres indiqués par l'appareil et celles calculés par le programme	69
Tableau (5.15) : les paramètres de rugosité en fonction de nombre du cut-off.....	70

Introduction

La surface d'un solide est un domaine à deux dimensions où se situent les interactions du solide avec le monde extérieur. La physique des surfaces a beaucoup progressé en cette deuxième moitié du vingtième siècle, et de nombreux domaines d'activités industrielles sont directement concernés par cette discipline. C'est à la surface d'un solide que se produisent les réactions chimiques qui la font évoluer et que se manifestent les phénomènes de frottements, d'usure, des adsorptions de contaminants divers. Depuis, la métrologie des masses jusqu'au fonctionnement des paliers, depuis, les états rectifiés des surfaces mécaniques jusqu'au superpoli des surfaces optiques, la métrologie des surfaces joue un rôle essentiel dans le contrôle de composants mécaniques, optiques ou électroniques.

Les propriétés d'une surface sont extraordinairement nombreuses et complexes. On cherche à les caractériser par des paramètres simples qui ne donneront bien évidemment jamais une représentation complète de ces propriétés. C'est pourquoi l'expérience est essentielle pour pouvoir déduire des observations la réponse à la question : la surface remplira-t-elle correctement ses fonctions ?

Dans la plupart des normes qui traitent des surfaces, l'examen visuel et tactile est souvent la première cité. Quoique qualitatif, il représente souvent une synthèse de paramètres difficilement quantifiables par d'autres moyens : texture, teinte, aspects en lumières diverses, sensations mécaniques et thermiques.

Le laboratoire de métrologie de notre département dispose un appareil de mesure Type TESA désigné par Rugosurf 10G, il permet le relevé des paramètres d'état de surface, et la représentation graphique et donne la possibilité de récupérer le fichier de mesure. L'objectif dans ce projet est de traiter et de déterminer le nombre maximum des paramètres qui seront calculés selon les normes disponibles.

Le projet est réparti en cinq chapitres. Dans le premier chapitre, nous présentons des généralités sur la métrologie et surtout sur le contrôle dimensionnel.

Le deuxième chapitre sera consacré à la caractérisation des états de surface, les différents écarts géométriques, et les méthodes actuelles utilisées pour la mesure des caractéristiques d'une surface.

Le troisième chapitre présentera les différents appareils de mesure des différents paramètres d'état de surface, et aussi une description détaillée du rugosimètre utilisé, le Rugosurf 10G de TESA.

Dans le quatrième chapitre, nous définissons les différents paramètres d'état de surface et les méthodes d'estimation pour calculer ces paramètres.

Enfin, dans le cinquième chapitre, nous ferons des mesures avec le rugosimètre sus-cité et le traitement du fichier de mesure récupéré dans l'objectif est de calculer le maximum des paramètres d'état de surface selon les normes disponibles.

Chapitre 1

Généralité sur les techniques de mesure

I. Définition de la métrologie

La métrologie est définie comme la science des mesures. Elle comprend le vaste domaine de la technique des mesures des grandeurs : unités de mesure, méthode de mesure, appareil de mesure, traitement des informations, etc. Elle se base sur définition et décisions des institutions internationales et nationales de métrologie pour assurer la reproductibilité des résultats de mesure.

La métrologie s'intéresse donc à tous les domaines de la technique de mesure. On distingue la métrologie électronique, électrotechnique, hydraulique, chimique, dimensionnelle, etc. elle s'intéresse également à l'aspect légal de la mesure [1].

I.1. Place de la métrologie parmi les sciences

La métrologie est une science qui conditionne les autres, ses lois s'appliquent à toutes les disciplines : c'est une super-science. Mais pour aboutir à ses fins elle puise dans les ressources de toutes les sciences et ses progrès sont étroitement liés à ceux de l'expérimentation : c'est une interscience.

Son enseignement, et l'aide de la contribution des chercheurs, se placent sur deux plans. D'un point de vue théorique, elle indique à l'opérateur qui fait les mesures, les meilleures conditions expérimentales, et à l'utilisateur qui les exploite, le degré de confiance qu'il peut placer dans les résultats qui lui sont fournis. D'un point de vue technique, elle précise au constructeur du matériel de mesure, qui est bien souvent aussi l'opérateur et l'utilisateur, les règles à observer dans la conception des instruments pour atteindre le résultat désiré [2].

Dans leur progression, la métrologie s'épaulent mutuellement ; l'une aidant l'autre, elles bénéficient réciproquement de leur progrès. Chaque pas de l'une correspond à une avance de l'autre.

I.2. Importance de la métrologie dans l'industrie

Ce n'est pas seulement le progrès scientifique que la métrologie a favorisé. Son rôle dans le développement industriel n'est pas moindre. Elle garantit au produit fabriqué une identité de forme, d'aspect, de propriétés, qui assurent l'interchangeabilité. Sans elle, la fabrication de série n'aurait pu se développer, et les industries mécaniques, automobiles, aéronautiques, etc, n'auraient pas pris l'extension qu'elles ont. Par voie de conséquence, elle accroît le rendement de la fabrication et assure le débouché commercial à la consommation.

Elle est aussi un facteur de sécurité ; en effet, elle permet de garantir la résistance mécanique des pièces fonctionnelles, la marche normale de la centrale atomique, etc.

Sans insister sur les caractères propres de la métrologie scientifique et de la métrologie industrielle, il faut cependant signaler que si la première a le souci d'atteindre la valeur vraie des grandeurs, la seconde a surtout pour préoccupation de vérifier que la grandeur se maintient entre certaines tolérances, qui sont souvent beaucoup plus serrées que ne l'est l'erreur à craindre sur la valeur vraie [2].

On s'oriente dans ce travail vers la métrologie dimensionnelle.

I.3. 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 s'assurer de leur validité. Actuellement, il existe une tendance à l'augmentation de la précision de l'ajustement, ceci impose une diminution des tolérances [3].

Le contrôle doit satisfaire les conditions suivantes :

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

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, elle permet d'éliminer les erreurs dues à la surface de contact ainsi que la déformation de la surface mesurée. Pour la réalisation des mesures sans contact, on utilise des appareils basés sur la pneumatique, électronique, l'optique.

Un contrôle a 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 [4].

Les cotes nominales indiquées sur le plan d'exécution doivent toujours être accompagnées de la mention de tolérance de fabrication. Pour une raison d'interchangeabilité et de production économique, il est recommandé d'appliquer les tolérances normalisées et de s'attacher en particulier aux normes ISO.

II. Tolérances :

Une pièce est définie par :

- Sa forme nominale ; limitée par des surfaces simples (plan), complexes (surfaces de Bézier). La pièce est définie par des dessins conventionnels ou par conception assisté par ordinateur (CAO).

II.1. Types et désignations des tolérances :

II.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 en comparant les valeurs des dimensions de la pièce réelle aux cotes limites définies par des écarts par rapport à la cote nominale; ces écarts pouvant être positifs, nuls ou négatifs [4] .

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].

Pour un alésage Ecart supérieur $ES = D_{max} - D_{nom}$

Ecart inférieur $EI = D_{min} - D_{nom}$

Pour un arbre Ecart supérieur $es = d_{max} - d_{nom}$

Ecart inférieur $ei = d_{min} - d_{nom}$

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

$$\text{Jeu maximale} \quad J_{max} = D_{max} - d_{min}$$

$$\text{Jeu minimale} \quad J_{min} = d_{min} - d_{max}$$

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.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.

II.1.3. Spécification de l'état de surface

Les divers procédés d'usinages (rabotage, tournage, fraisage, rectification, rodage, superfinition, etc) laissent tous à des degrés plus ou moins importants subsister des défauts d'état de surface sur les pièces.

Les propriétés des solides et leur comportement dépendent, souvent, davantage des caractéristiques de leurs surfaces que de leurs propriétés massiques ou volumiques. La surface d'un corps solide est la partie de ce solide qui le limite dans l'espace et le sépare du milieu environnant. Elle est prépondérante pour assurer des fonctions telles que l'aptitude aux

frottements, la résistance à l'usure ou la corrosion, conduction thermique et électrique, résistance aux contraintes mécaniques, étanchéité statique ou dynamique, aspect, etc

Les surfaces industrielles produites par des moyens techniques présentent toujours des irrégularités par rapport à la surface idéale. Pour les décrire en toute rigueur, il faudrait utiliser une fonction continue $z(x, y)$ donnant l'altitude de chaque point par rapport à la surface idéale.

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 spécifier sur un dessin technique ?

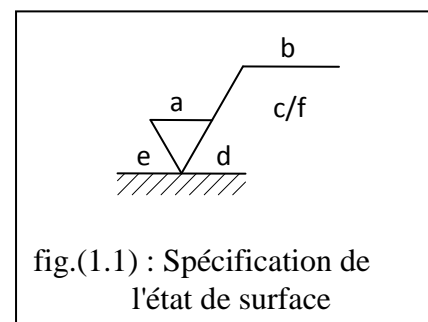
— la réalisation de la surface : quels moyens mettre en œuvre pour obtenir l'état de surface souhaité ?

— la mesure de la surface : quels moyens et quelles conditions de mesure pour vérifier que la surface correspond aux spécifications ?

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. On tolère aussi des spécifications de l'état de surface qui seront définies par des paramètres.

Les spécifications d'état de surface doivent être disposées autour du symbole comme l'indique la figure (1.1).

- (a) Valeur de la rugosité R_a ou ses valeurs limites maximale et minimale en μm
- (b) Procédé de fabrication, traitement ou revêtement
- (c) longueur de base en mm
- (d) direction des stries d'usinage
- (e) surépaisseur d'usinage en mm
- (f) autres valeurs de rugosité en μm



II.2. Principes de cotation :

- **Principe de l'enveloppe [6]**

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. 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).²

- **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.

III. Conclusion :

Globalement, le contrôle des pièces mécaniques ou autre est indispensable pour avoir un produit de qualité. Plusieurs entreprises et laboratoires contrôlent leurs produits en se référant aux normes en s'attachant en particulier aux normes ISO.

Ne pouvant réaliser un produit à 100% parfait, on fixe des plages (intervalle de tolérance) pour ramener ce produit à des résultats acceptables.

CHAPITRE 2

Caractérisation des états de surface

I. Introduction

Dans ce chapitre, on présente les principales techniques de caractérisation de surface qui existent actuellement. On cite aussi, à travers quelques rappels théoriques, l'intérêt qu'elles présentent et les informations qu'elles peuvent fournir pour la caractérisation des types d'échantillons.

On appelle états de surface les irrégularités des surfaces dues au procédé d'élaboration de la pièce (usinage, moulage, etc.). Ils sont le plus souvent, mesurés avec des appareils à palpeur à pointe de diamant, appelés *profilomètres*, qui relèvent le profil de la surface (figure 2.1). Ces appareils impriment un graphique anamorphosé du profil réel palpé (c'est-à-dire que l'agrandissement vertical est plus important que l'agrandissement horizontal). Ce graphique permet de visualiser la forme des irrégularités et d'estimer leur profondeur et leur espacement [5].

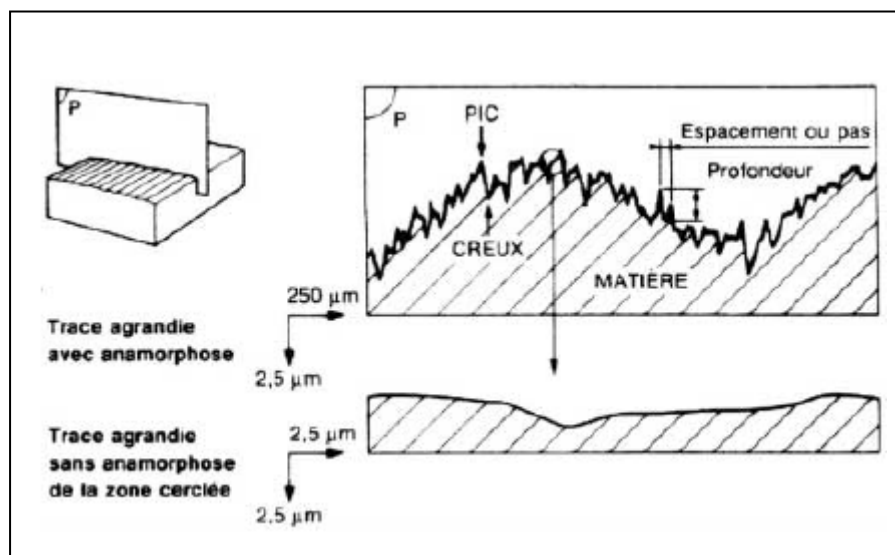


Figure (2.1) Relevé d'un profil d'état de surface [5]

II. 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) [7].

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 [7].

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.

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

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

II.1. 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.

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

Exemple :

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

II.1.1 la Norme ISO 4287

La présente Norme internationale prescrit les termes, définitions et paramètres pour la détermination de l'état de surface (profils de rugosité, d'ondulation et profil primaire) par les méthodes de profil.

II.1.2 la Norme ISO 25178

ISO 25178 désigne un ensemble de normes internationales définissant l'analyse des états de surface surfaciques (appelés aussi états de surface 3D).

Cette norme en plusieurs parties a été rédigée par le groupe de travail WG16 au sein du comité technique TC213 de l'ISO (Organisation internationale des standards).

Il s'agit de la première norme au monde prenant en compte la spécification et la mesure des états de surface tridimensionnels. La norme définit notamment les paramètres surfaciques d'état de surface et les opérateurs de spécification associés. Elle décrit également les technologies de mesure applicables, les méthodes pour les étalonner ainsi que les étalons matérialisés ou les étalons logiciels nécessaires.

III. Différents écarts géométriques de l'état de surface

Un profil de surface est la courbe résultant de l'intersection de la surface réelle et d'un plan spécifié. Ce plan est perpendiculaire à la surface de l'échantillon et orienté généralement perpendiculairement au sens des stries d'usinage. Un profil de surface, outre la forme nominale de la pièce, est composé de différents écarts géométriques, auxquels correspondent différents profils :

La représentation graphique de l'état de surface est toujours anamorphosée. L'amplification verticale est généralement beaucoup plus importante que l'amplification horizontale. Cette anamorphose a comme effet de compresser le profil réel et d'en donner une image très différente de la réalité. Sur les dessins techniques, les écarts de forme et les paramètres de rugosité sont souvent spécifiés. Mais l'ondulation ne l'est que très rarement. Pourtant la spécification des écarts d'ondulation est très importante pour assurer certaines fonctions, comme l'étanchéité, le déplacement entre deux surfaces, etc. Des écarts d'ondulation conséquents peuvent entraîner des dysfonctionnements tels que fuites, bruits, usure prématurée, etc.

La frontière entre la rugosité et l'ondulation est arbitraire, aucune définition absolue n'existe. En pratique, le classement s'effectue à partir de la distance entre les pics

La caractérisation de l'état de surface nécessite [9]:

- une prise de données très fine sur la surface, avec une très grande amplification des données ;
- la séparation des écarts géométriques ;
- la caractérisation de chaque écart par des paramètres.

III.1.Types des défauts

Le profil d'une surface est obtenu par une coupe de celle-ci avec un plan normal, 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 [1].

III.1.1.Ordre 1 : Ecarts de forme

Les différents types de défauts représentés par l'ordre 1 sont :

- Les défauts de planéité
- Les défauts de rectitude
- Les défauts de circularité

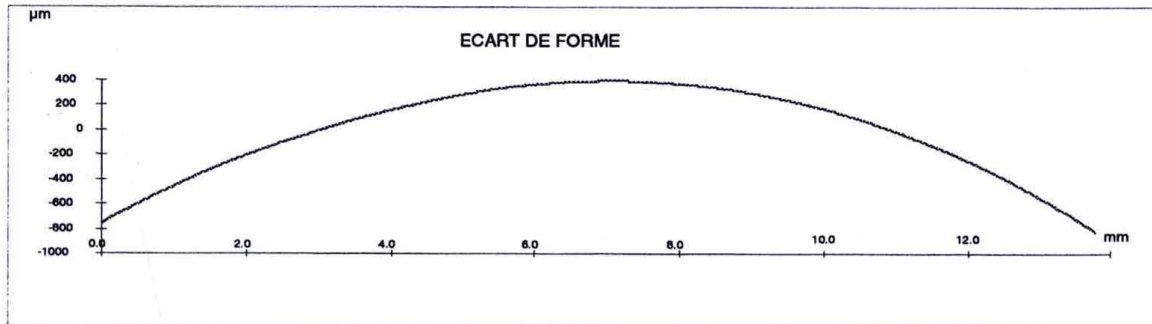


Figure (2.2) : Ecart de forme [5]

III.1.2. Ordre 2 : Ecarts d'ondulation

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.

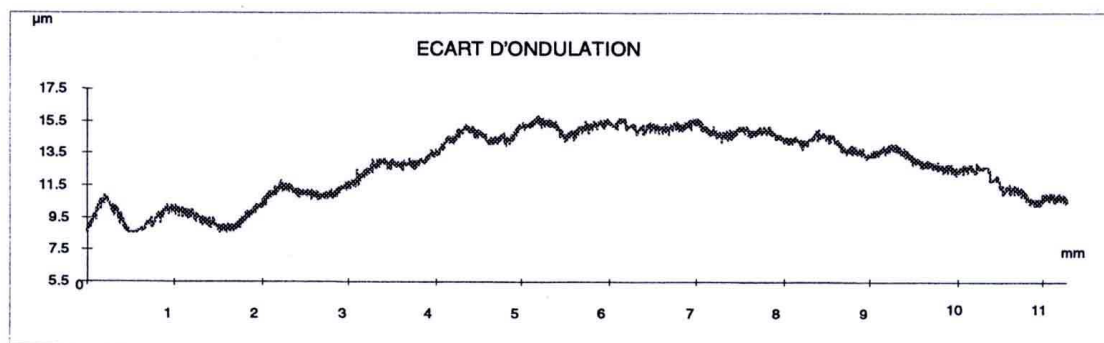


Figure (2.3) : Ecart d'ondulation [5]

III.1.3. Ordre 3 : Ecarts de rugosité périodique (Stries , sillons)

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.

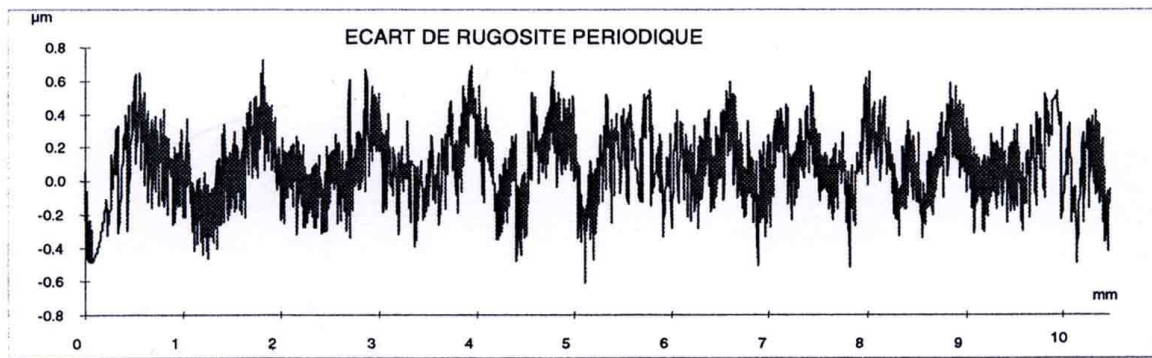


Figure (2.4) : Ecart de rugosité périodique [5]

III.1.4.Ordre 4 : Ecarts de rugosité apériodique (Arrachements, fentes, piqûres)

Ces défauts sont les plus irréguliers et sont souvent accidentels : arrachement de matière, fentes,..., le pas entre deux irrégularités est au maximum de $20\ \mu\text{m}$ (ce sont des défauts apériodiques). [1]

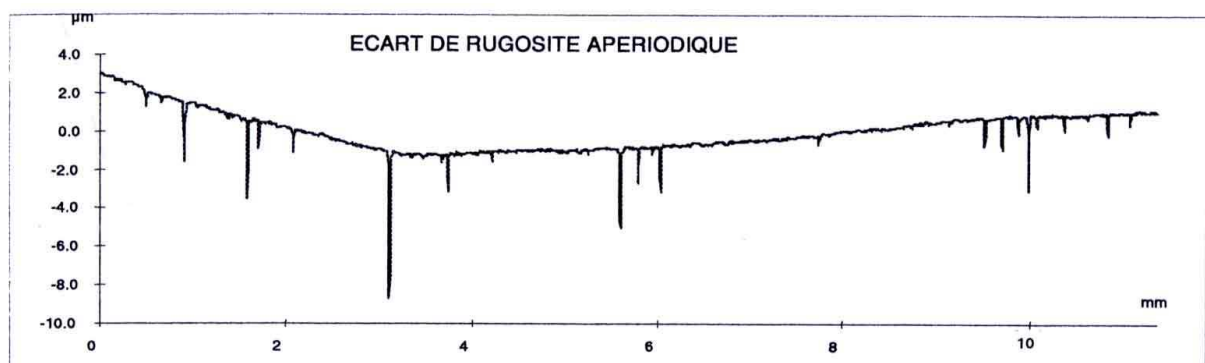


Figure (2.5) : Ecart de rugosité aperiodique [5]

La seule méthode reconnue par les normes consiste à enregistrer un profil à l'aide d'un instrument à contact puis à en effectuer son traitement

IV. Analyse d'une 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 [4].

- 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 indiquée 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.1. Filtre de profil

Filtre qui sépare le profil en composantes de longueur d'onde longue et composantes de longueur d'onde courte.

Trois filtres sont utilisés dans les instruments de mesure des profils de rugosité, d'ondulation et du profil primaire. Ils ont tous les mêmes caractéristiques de transmission, définies dans l'ISO 11562, mais des longueurs d'onde de coupure différentes [8].

IV.1.1 filtre de profil λ_s

Filtre qui définit la séparation entre les composantes de rugosité et les composantes d'onde encore plus courtes présentes à la surface (voir la figure 2.6)

IV.1.2. filtre de profil λ_c

Filtre qui définit la séparation entre les composantes de rugosité et les composantes d'ondulation.

IV.1.3. filtre de profil λ_f

Filtre qui définit la séparation entre les composantes d'ondulation et les composantes d'onde encore plus longues présentes à la surface.

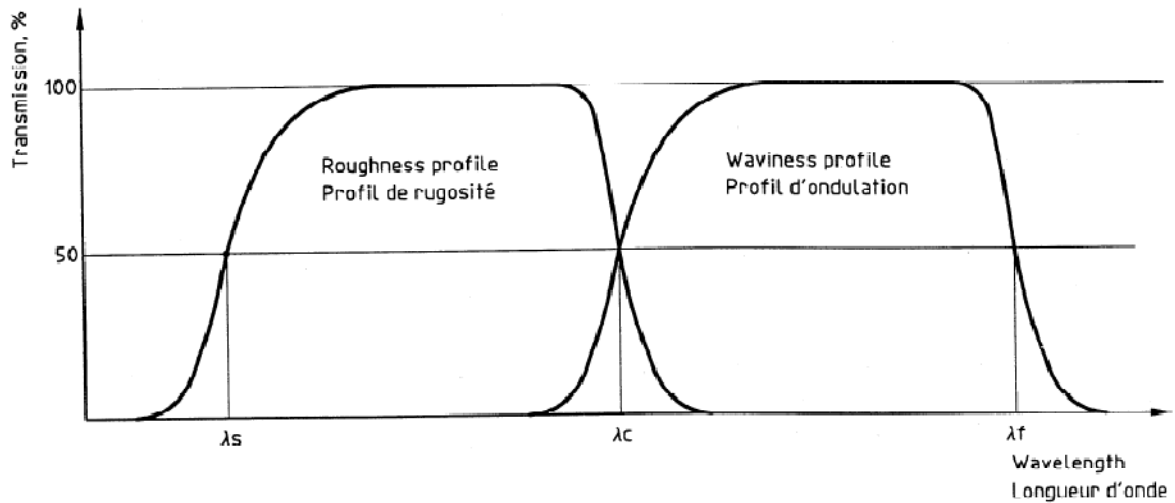


Figure (2.6) : caractéristiques et transmission des profils de rugosité et d'ondulation [8]

IV.2. Etude de profil :

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

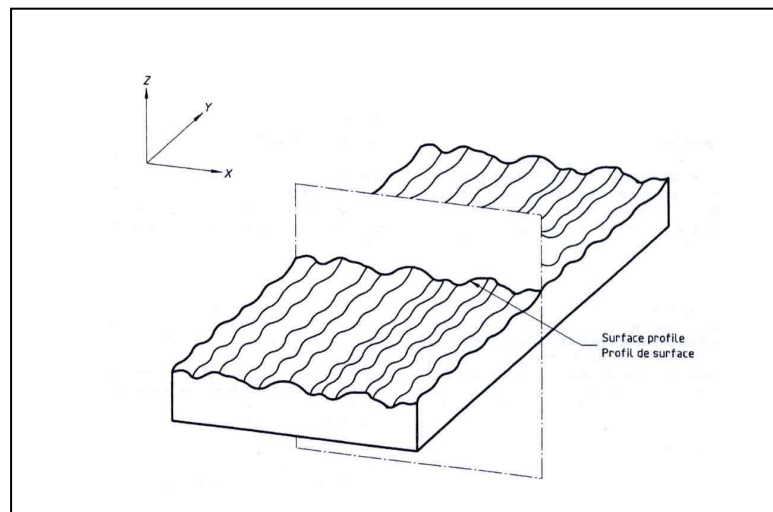


Figure (2.7) : profil de surface

IV.2.1 .Les différents Types de Profils (ISO 3274)

IV.2.1.1.Le Profil Brut

Profil résultant de l'intersection de la surface et d'un plan spécifié

-Axe X = direction de palpé

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

L'unité d'avance guide le capteur selon une référence rectiligne.

Les écarts de parallélisme entre la génératrice de la pièce et la référence de guidage de l'appareil apparaissent sur ce profil.

IV.2.1.2.Le Profil Primaire

Profil issu du profil brut après application du filtre de longueur d'onde courte λ_s qui sépare les composantes de rugosité des composantes d'onde encore plus courtes (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.

IV.2.1.3.Le 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_c qui sépare les composantes de rugosité des composantes d'ondulation. Ce profil est intentionnellement modifié et sert de base à l'évaluation des paramètres de rugosité.

IV.2.1.4.Le Profil d'ondulation

Profil dérivé du profil primaire par application successive des filtres de profil λ_f et λ_c supprimant ainsi les composantes de très grande longueur d'onde à l'aide du filtre de profil λ_f et les composantes de faible longueur d'onde à l'aide du filtre de profil λ_c . Ce profil est intentionnellement modifié et sert de base à l'évaluation des paramètres d'ondulation.

IV.2.2. Caractéristiques d'états d'une surface réelle [8]

Une surface réelle est caractérisée par plusieurs termes à définir :

La direction générale du profil est équivalente à la ligne des moindres carrés du profil

1. Ligne moyenne du profil de rugosité

Ligne qui correspond à la composante de profil de grande longueur d'onde supprimée par le filtre de profil λc

2. Ligne moyenne du profil d'ondulation

Ligne qui correspond à la composante de profil de grande longueur d'onde supprimée par le filtre de profil λf

3. Ligne moyenne du profil primaire

Ligne déterminée en calculant, d partir du profil primaire, une ligne des moindres carrés de forme nominale

4. Longueur de base l_p, l_r, l_w

La longueur de base est définie par l'outil de mesure dans la direction de l'axe des X, utilisée pour identifier les irrégularités caractérisant le profil à évaluer

5. Longueur d'évaluation L_n

La longueur d'évaluation est la longueur totale à mesurer dans la direction de l'axe des X, utilisée pour établir le profil à évaluer.

La longueur d'évaluation peut comprendre une ou plusieurs longueurs de base.

IV.3. 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 [5]. Parmi ces méthodes, on cite :

IV.3.1 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.

IV.3.2 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.

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

IV.3.3 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.

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 montée avec serrage ou après fonctionnement. Elle permet de prévoir aussi pour :

- la phase rodage, les pics les plus saillants qui vont être usés et disparaître pendant les premiers heures de fonctionnement (par exemple, dans un moteur, l'absence de ce critère limitera d'autant le temps de rodage de ce lui-ci)
- la phase fonctionnement normal, la partie central du profil représente la quantité de matière disponible à l'usure (plus cette quantité est disponibles, le moteur fonctionnera longtemps) [2].
- la lubrification, les creux disponibles et toujours utiles pour retenir un lubrifiant (l'absence ou la disparition des ces creux entraînent le grippage d'un moteur) [2].

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

V. Conclusion

L'état de surface apparait souvent comme un domaine complexe et mal connu, en fait, il faut reconnaître qu'il n'est pas possible de caractériser la géométrie d'une surface par un seul paramètre.

CHAPITRE 3

Appareils de mesure d'état de surface

I. Introduction

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 [9].

Les écarts d'ordre 1 (défauts macro géométrique : défaut de forme, planéité, rectitude, etc) s'obtiennent à l'aide de divers appareils de contrôle. Pour enregistrer les écarts de forme du 2^{ème} aux 5èmes ordres, il y a plusieurs méthodes de contrôle dont la précision dépend de la conception et de principe de fonctionnement de l'appareil.

On distingue plusieurs méthodes de contrôle d'état de surface :

- La méthode viso-tactile qui est la plus simple. Elle permet de situer l'état de surface mesurée entre deux états de surface limites, par conséquent elle ne chiffre pas l'état de surface.
- Les appareils à contact (stylet)
- Les appareils optiques qui sont à haute technologie.

II. La méthode Viso-tactile

La méthode est basée sur la comparaison visuelle et tactile (toucher à l'ongle) de la surface réelle résultant d'un procédé de fabrication particulier (rabotage, tournage, fraisage, rectification, super finition, etc) par rapport à une surface étalon (rugotest) caractérisé par une rugosité Ra. Ces étalons réalisés en acier inoxydable rassemblent les divers échantillons de surfaces obtenues par usinage, ils sont obtenus à partir de matrices uniques, par un procédé d'électroformage.

Le contrôle des états de surface par la méthode Viso-tactile est particulièrement utilisé pour une expertise rapide (utilisation courante en atelier), mais ne donne aucune valeur précise de la rugosité de la surface usinée.

III. les appareils à palpeur

Le palpeur à base de stylet est la technique classiquement utilisée pour mesurer le relief 2D d'une surface. La plupart des stylets sont de simples diamants façonnés de manière à présenter un angle de cône et un rayon de courbure bien définis.

Ce type d'équipement, suivant son degré de perfectionnement, permet la mesure de tout ou partie des paramètres définis dans le chapitre suivant. La figure (3.1) représente, de façon schématique, un appareil à palpeur dont les différents composants sont définis ci-après :

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

- **convertisseur analogique-numérique (ADC)** : dispositif qui convertit le signal de l'appareil en valeurs numériques.

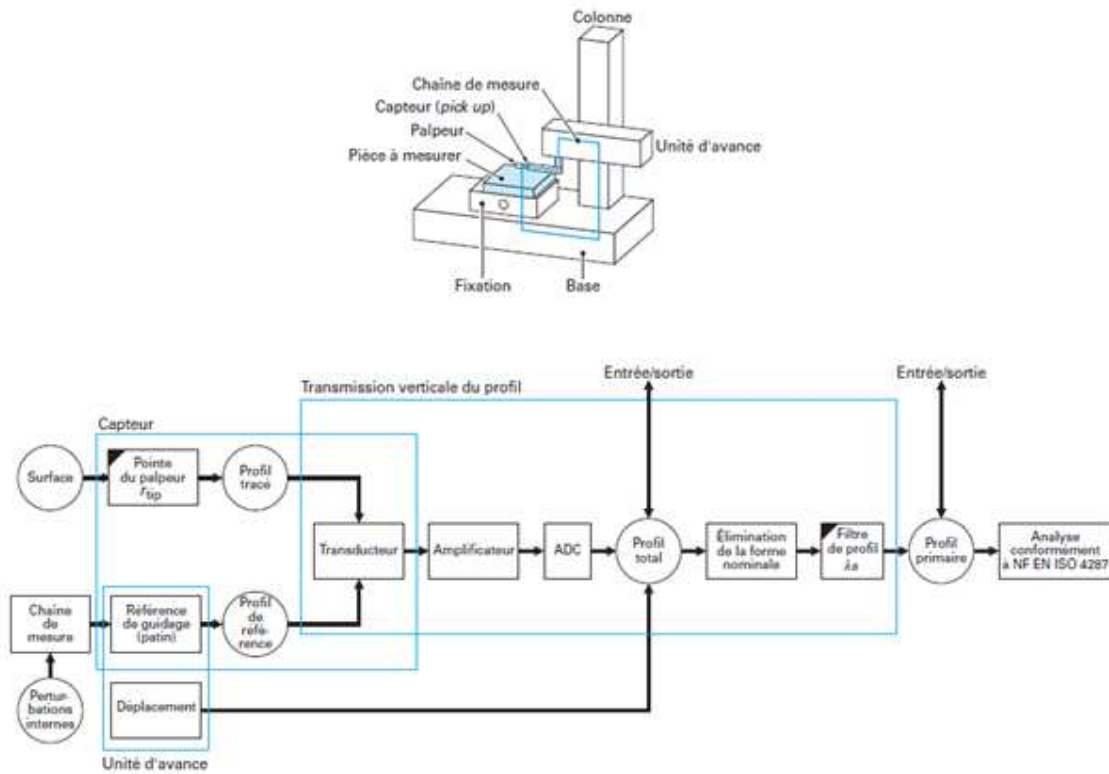


Figure (3.1) : Représentation schématique d'un appareil à palpeur [6]

III.1. Procédure :

Dans le procédé du palpé 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 μm , 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.

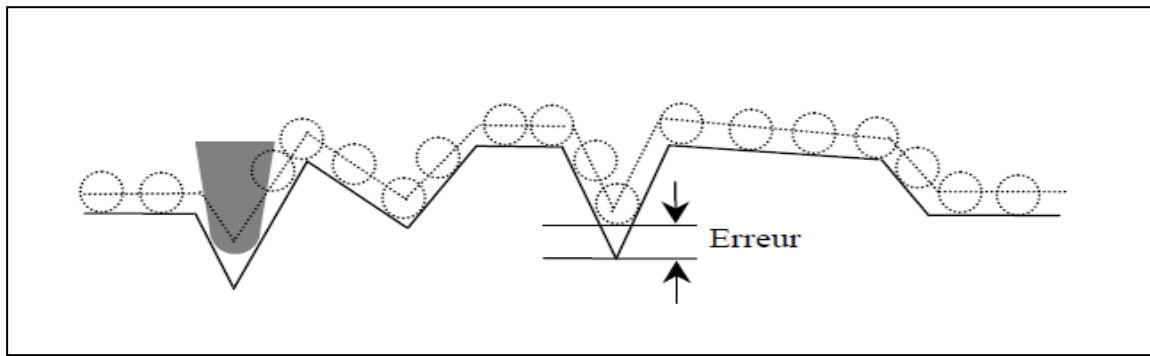


Figure (3.2) : Déplacement de point du palpeur [11]

Parmi les inconvénients de cette technique, on peut citer :

_ le profil de rugosité mesuré ne constitue pas une représentation parfaite du profil réel de la surface, il représente la convolution de la forme de la pointe et celle du relief. L'erreur commise dans les creux liée au rayon de courbure de la pointe et les problèmes rencontrés quand on travaille sur des surfaces réentrantes montrent bien cette limitation (Figure 3.4),

_ la force d'appui de la pointe peut influencer le résultat d'une mesure de rugosité car, si cette force est insuffisante, le stylet peut difficilement suivre le profil superficiel tout en rebondissant sur des aspérités rapprochées. Si la force d'appui est trop grande, le stylet peut endommager la surface étudiée et dans certains cas on risque de casser la pointe.

III.2. L'appareil TESA Rugosurf 10G :

Nous avons utilisé dans notre travail un appareil à palpeur de type TESA désigné par Rugosurf 10G.

- **Description générale**

TESA Rugosurf 10G est un rugosimètre léger, tenant dans la poche, maniable et facile à utiliser. Contrôlé par un microprocesseur, il utilise un affichage graphique (LCD-TFT). Il est alimenté par un bloc batteries assurant une autonomie de fonctionnement remarquable.

Ce rugosimètre comprend un boîtier électronique, une unité d'avance incorporée. Il permet de mesurer les principaux paramètres de rugosité sur une surface avec une résolution

de quelques millièmes. Qu'il soit tenu en main ou fixé sur un support, cet instrument peut affronter toutes les conditions d'utilisation. Afin d'éviter les vibrations susceptibles de fausser les mesures, on peut l'enclencher et démarrer la mesure soit depuis l'imprimante utilisée en tant que commande à distance pour le transfert des valeurs mesurées, soit à l'aide de la commande à distance ou encore du logiciel Rugosoft 10 [12].

L'étendue de mesure est automatiquement réglée lorsque on choisit l'un des trois cut-offs disponibles. On peut également changer cette étendue en sélectionnant le nombre de cut-offs à utiliser pour la mesure. Ce nombre est compris entre 2 et 10.

Les fonctions les plus courantes comme le rappel des résultats ou des cut-offs ainsi que le démarrage d'une opération de mesure sont directement accessibles depuis le clavier alors que toute autre fonction liée à des paramètres mesurables est disponible en tant que fonction auxiliaire. De plus, les menus nous permettent de prédéfinir des tolérances pour chaque paramètre, ce qui facilite les vérifications en série.



Figure (3.3) : l'appareil TESA Rugosurf 10G

La Saisie des paramètres de rugosité se fait selon les normes ISO 4287:1997/JIS B0601:2001, DIN et ISO 12085 :1998 (MOTIF ou CNOMO).

Tableau (3.1) : paramètres mesurés par Rugosurf 10G suivant les Normes Internationales [12]

ISO 4287 1997	Ra-Rq(RMS)- Rt- Rz- Rp- Rv- Rc- RSm- Rδc-Rmr- Pa- Pq -Pt- Pp- Pv -Pc- Psm- Pδc
DIN 4776	Rmax
ISO 12085	Pt-R- AR- Rx
ISO 13565	Rk -Rpk -Rvk -Mr1- Mr2
PrEN 10049	Rpc- Ppc
DB N31007	R3z -R3zm

III.3. l'étalonnage du palpeur :

L'étalonnage d'un instrument consiste à appliquer une valeur connue en entrée du système de mesure afin de vérifier que la sortie correspond bien à la valeur attendue. La valeur d'entrée est obtenue grâce à l'utilisation d'une grandeur étalon. En entrant différentes valeurs connues on peut obtenir en sortie la courbe d'étalonnage $y=f(x)$ de l'instrument qui permet de relier la valeur lue en sortie notée y à la vraie valeur de la grandeur physique à mesurer notée x . C'est particulièrement utile lorsque la réponse de l'instrument est non linéaire. Ce type d'étalonnage est effectué par le fabricant de l'appareil de mesure [11].

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 différent 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...

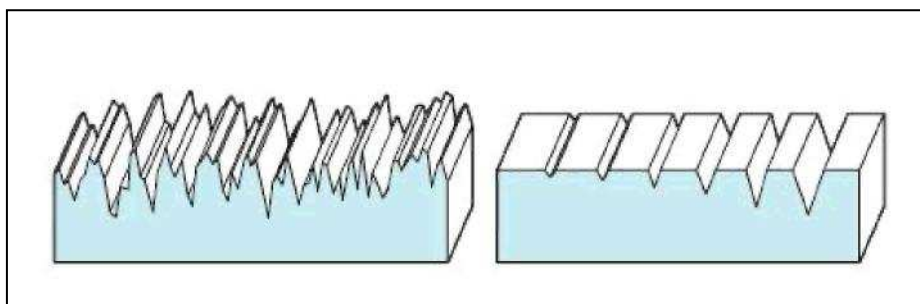


Figure (3.4). Etalons des rugosimètres [6]

Etalonnage la valeur du paramètre Ra mesuré doit être proche de la valeur spécifiée. L'étalonnage est réalisé sur la base du paramètre Ra (ou de la valeur de R pour ISO12085). La valeur de référence (spécimen) sera réglée avant d'effectuer la mesure.

IV. 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.

IV.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 [10].

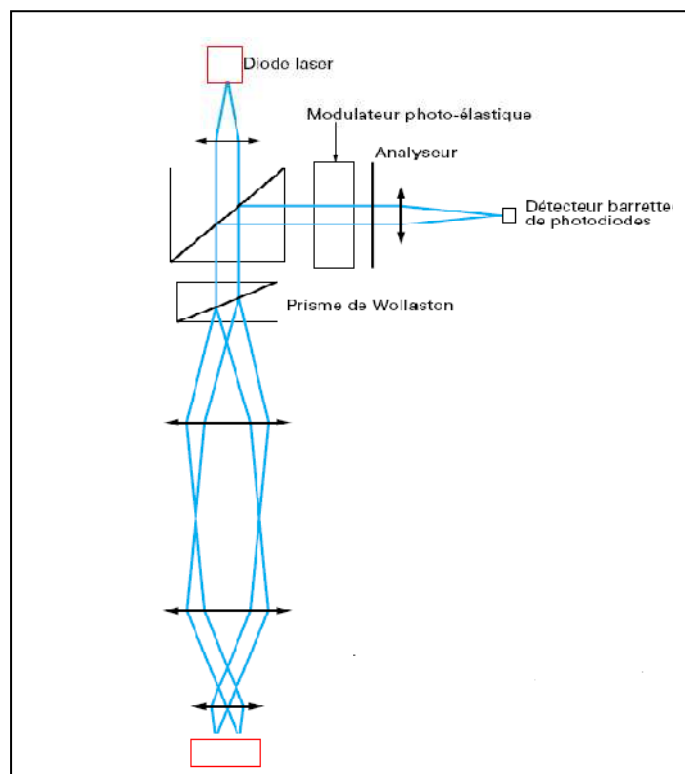


Figure (3.5). Microscope interférentiel à polarisation pour l'étude de la rugosité

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...) [10].

IV.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 laminaire 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 [9].

IV.3. Détermination de la rugosité par les microscopies :

Ils existent plusieurs types de microscopies plus développées (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.

IV.3.1. microscopes à effet tunnel :

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

· Procédure :

Pour déterminer les caractéristiques d'une surface il suffit d'approcher l'instrument de celle-ci à une distance telle 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 [9].

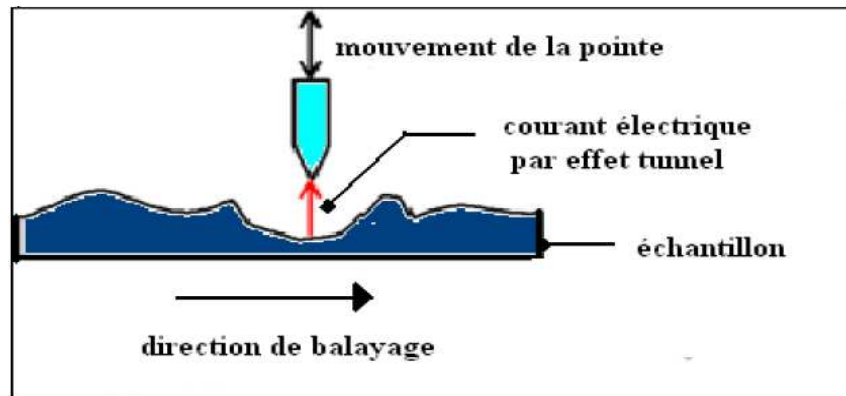


Figure (3.6) : Microscope à effet tunnel

Les variations de courant électrique collecté 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.

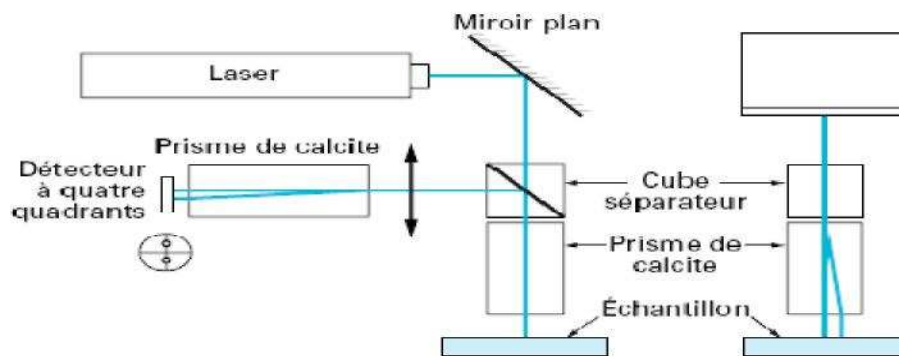
Pour ce type de microscopes, deux modes de fonctionnement existent, le premier représente les microscopes électroniques classiques, leurs avantages est de travailler dans des conditions de température (298 K) et pression atmosphérique, mais pour des échantillons isolants tel que les forces de Vander 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....

IV.3.2. Microscope à balayage laser :

Ces instruments de mesure servent 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 fragiles 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 [10].



« Figure (3.7). 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 [6].

IV. Conclusion

TESE Rugosurf 10G est instrument compact, robuste et polyvalent, il Permet un contrôle aisé des états de surface et la mesure des paramètres de rugosité avec une entrée possible de tolérances pour tous les paramètres disponibles.

CHAPITRE 4

Paramètres d'état de surface

I. Introduction

Nous pouvons définir une surface du point de vue de la géométrie analytique comme l'ensemble des points de coordonnées x , y et z vérifiant une équation de la forme : $F(x,y,z)=0$.

Ceci est une fonction permettant de représenter points par points les différences de hauteurs par rapport à une ligne de référence. Elle permet de représenter en tous points la déviation entre la topographie mesurée et le plan moyen.

Pour caractériser une surface, le mathématicien définit une surface par une équation, alors que le physicien et le chimiste doivent l'observer et l'analyser à l'aide d'une technique de caractérisation. Le choix d'une telle technique dépend fortement du type d'échantillon à caractériser et du type d'information que l'on désire obtenir.

II. Paramètres d'état de surface 2D

Quand on veut déterminer les caractéristiques physiques d'une surface à partir de l'analyse d'un profil (2D) mesurée, deux questions majeures se posent : quelle définition mathématique peut-on donner à la rugosité, puisque c'est l'information que l'on cherche à déterminer, et comment peut-on la mesurer ? En effet, le problème principal est de définir des critères qui vont nous permettre de caractériser la topographie de la surface, indépendamment de la technique de mesure, avec des paramètres significatifs. De nombreuses définitions peuvent rendre compte de la rugosité. Celles que nous avons utilisées principalement dans ce travail sont définies selon la norme internationale ISO 4287 [11] basée sur l'exploitation d'un profil (2D) obtenu par un palpeur mécanique (les méthodes de profil) et non d'une image

(3D). Le profil est amplifié et enregistré, puis le tracé est traité ultérieurement afin de calculer les paramètres pouvant être utilisés pour décrire la surface correspondante.

Les paramètres 2D peuvent être calculés respectivement sur le profil brut (P), ou après filtrage, sur le profil de rugosité (R) ou le profil d'ondulation (W). La séparation entre ondulation et rugosité est effectuée par filtrage. Pour chaque paramètre, on définit le type de filtre et la longueur d'onde de coupure à utiliser [11]. Cette longueur d'onde, appelée "cut-off", représente la limite entre ondulation et rugosité, elle peut prendre un certain nombre de valeurs normalisées. La longueur de base, l , du profil dans la direction de l'axe X, est numériquement égale à la longueur d'onde caractéristique du filtre choisi pour les profils de rugosité et d'ondulation. La longueur d'évaluation, L , utilisée pour établir le profil à analyser, peut contenir une ou plusieurs longueurs de base (Figure 4.1).

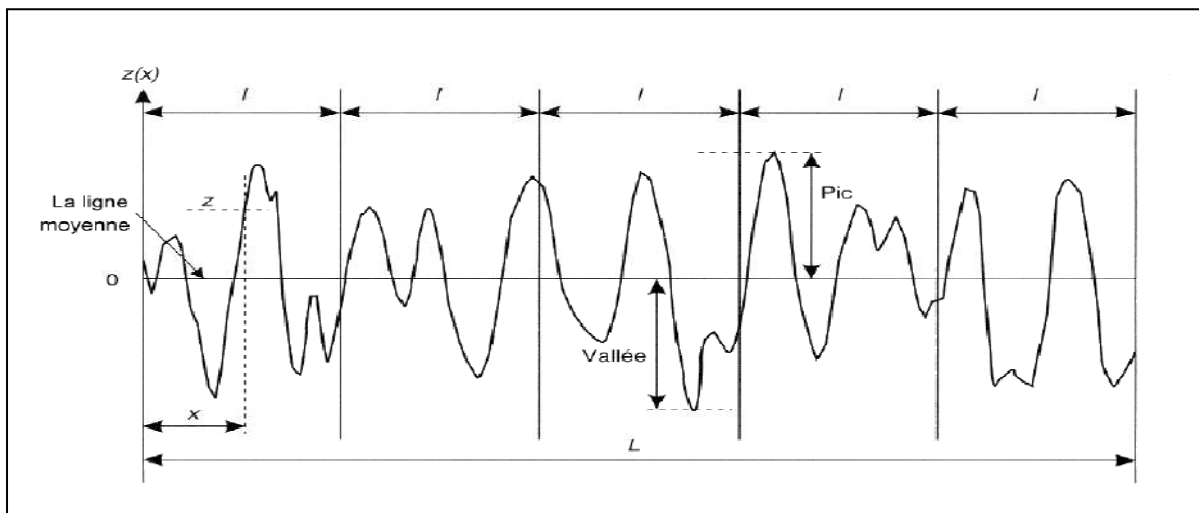


Figure (4.1) : Longueur d'évaluation "L" d'un profil comportant cinq longueurs de base "l" (cut-off).

Les paramètres (2D) de base caractérisant l'amplitude, définis selon la norme internationale ISO 4287, sont donnés par :

II.1. Définitions des Paramètres relatifs à la Norme ISO 4287

Cette norme définit différents paramètres de rugosité en les classant en 4 familles

- Paramètres d'amplitude
- Paramètres d'espacement

- Paramètres hybrides
- Courbes et paramètres associés

II.1.1. Paramètres d'amplitude (saillie et creux)

1. hauteur maximale de saillie du profil P_p, R_p, W_p

C'est la Plus grande des hauteurs de saillie du profil, Z_p , à l'intérieur d'une longueur de base

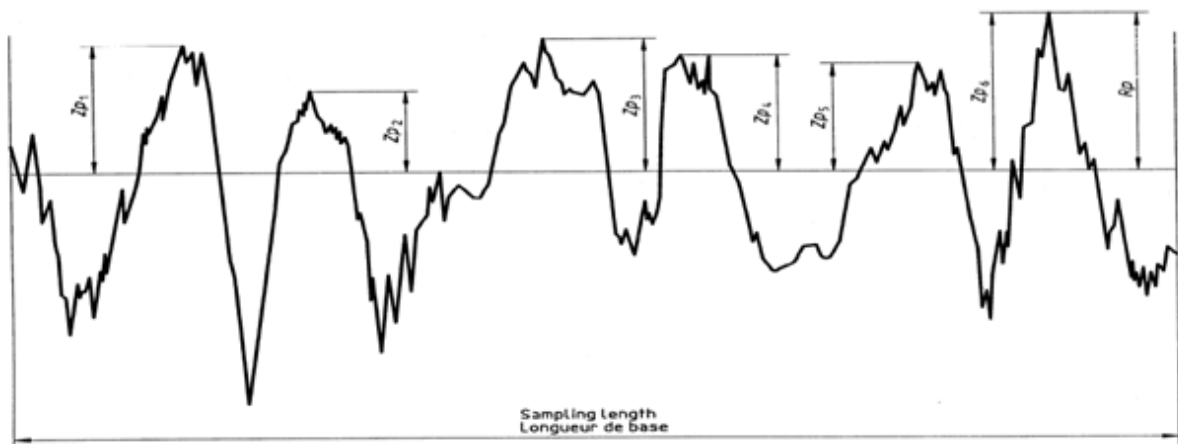


Figure (4. 2) hauteur maximale de saillie des profils

2. Profondeur maximale de creux du profil P_v, R_v, W_v

C'est la Plus grande des profondeurs de creux du profil, Z_v , l'intérieur d'une longueur de base

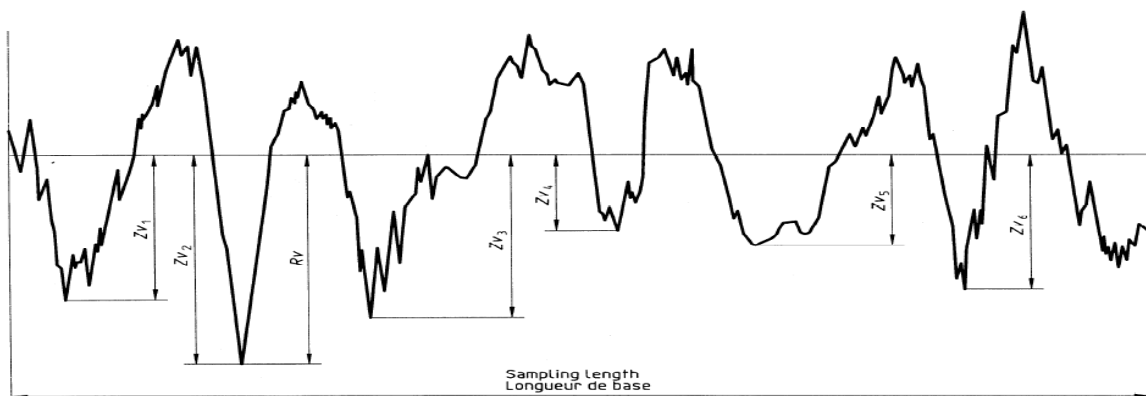


Figure (4.3) : Profondeur maximale de creux du profil

3. Hauteur maximale du profil Pz, Rz, Wz

Somme de la plus grande des hauteurs de saillie du profil, Zp , et de la plus grande des profondeurs de creux du profil, Zv , à l'intérieur d'une longueur de base (figure 3.4).

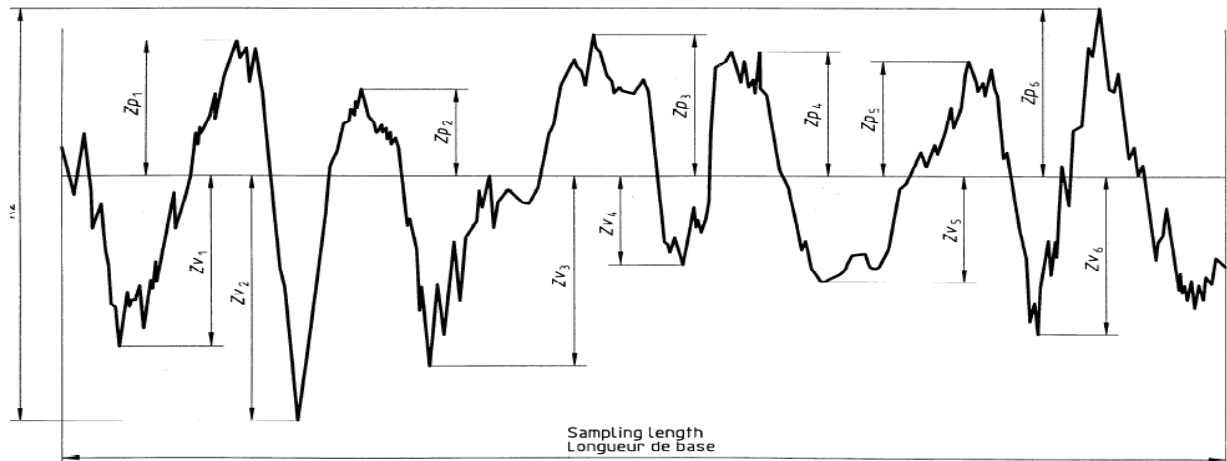


Figure (4.4) : hauteur maximale du profil

4. Hauteur moyenne des éléments du profil Pc, Rc, Wc

C'est la Valeur moyenne des hauteurs des éléments du profil, Zt , à l'intérieur d'une longueur de base.

$$Pc, Rc, Wc = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m Zt_i \quad (4.1)$$

Les paramètres Pc, Rc, Wc nécessitent une discrimination de hauteur et d'espacement. Sauf spécification contraire, la discrimination de hauteur par défaut doit être de 10 % de Pz, Rz, Wz respectivement, et la discrimination d'espacement par défaut doit être de 1 % de la longueur de base. Les deux conditions doivent être respectées.

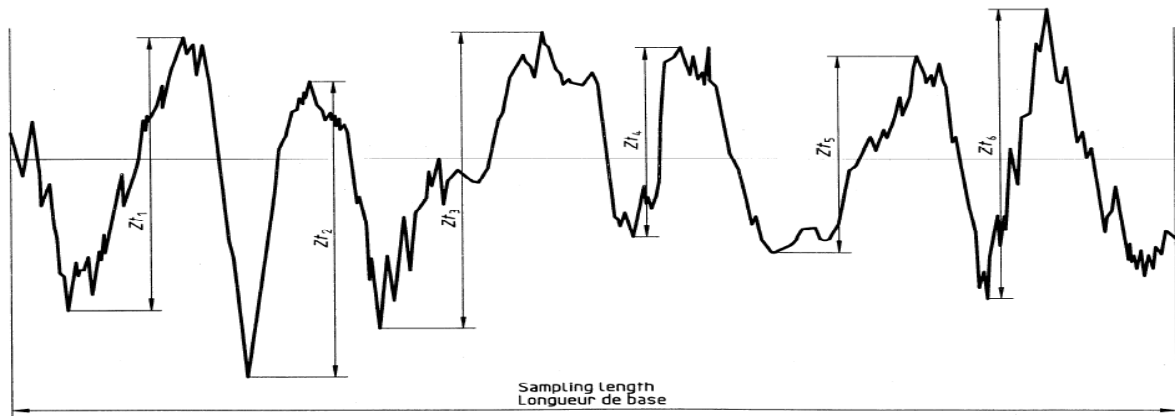


Figure (4.5) : hauteurs moyennes des éléments du profil

5. Hauteur totale du profil Pt , Rt , Wt

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

On a toujours $Pt \geq Pz$; $Rt \geq Rz$; $Wt \geq Wz$

Par défaut, Pz est égal à Pt , dans ce cas l'utilisation de Pt est recommandée.

II.1.2. Paramètres d'amplitude (moyenne des ordonnées)

1 .Ecart moyen arithmétique du profil évalué Pa , Ra , Wa

Moyenne arithmétique des valeurs absolues des ordonnées $Z(x)$ à l'intérieur d'une longueur de base.

$$Pa, Ra, Wa = \frac{1}{l} \int_0^l |Z(x)| dx \quad (4.2)$$

2 .Ecart moyen quadratique du profil évalué Pq , Rq , Wq

Moyenne quadratique des valeurs des ordonnées $Z(x)$ à l'intérieur d'une longueur de base.

$$Pq, Rq, Wq = \sqrt{\frac{1}{l} \int_0^l Z^2(x) dx} \quad (4.3)$$

3 .Facteur d'asymétrie du profil évalué Psk, Rsk, Wsk

C'est la Quotient de la moyenne des cubes des valeurs des ordonnées $Z(x)$ par le cube du paramètre Pq, Rq ou Wq selon le cas, a l'intérieur de la longueur de base.

$$Rsk = \frac{1}{Rq^3} \left[\frac{1}{l_r} \int_0^l Z^3(x) dx \right] \quad (4.4)$$

4 .Facteur d'aplatissement du profil évalué Pku, Rku, Wku

Quotient de la moyenne des valeurs à la puissance 4 des ordonnées $Z(x)$ par la valeur a la puissance 4 du paramètre Pq, Rq ou Wq selon le cas, a l'intérieur d'une longueur de base.

$$Rku = \frac{1}{Rq^4} \left[\frac{1}{l_r} \int_0^l Z^4(x) dx \right] \quad (4.5)$$

Ces paramètres sont fortement influences par des saillies isolées ou des creux isolés [8].

II.1.3. Paramètres d'espacement

1. Largeur moyenne des éléments du profil PSm, RSm, WSm

Valeur moyenne des largeurs des éléments du profil, Xs , a l'intérieur d'une longueur de base.

$$PSm, RSm, WSM = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m Xs_i \quad (4.6)$$

Voir la figure (4.6)

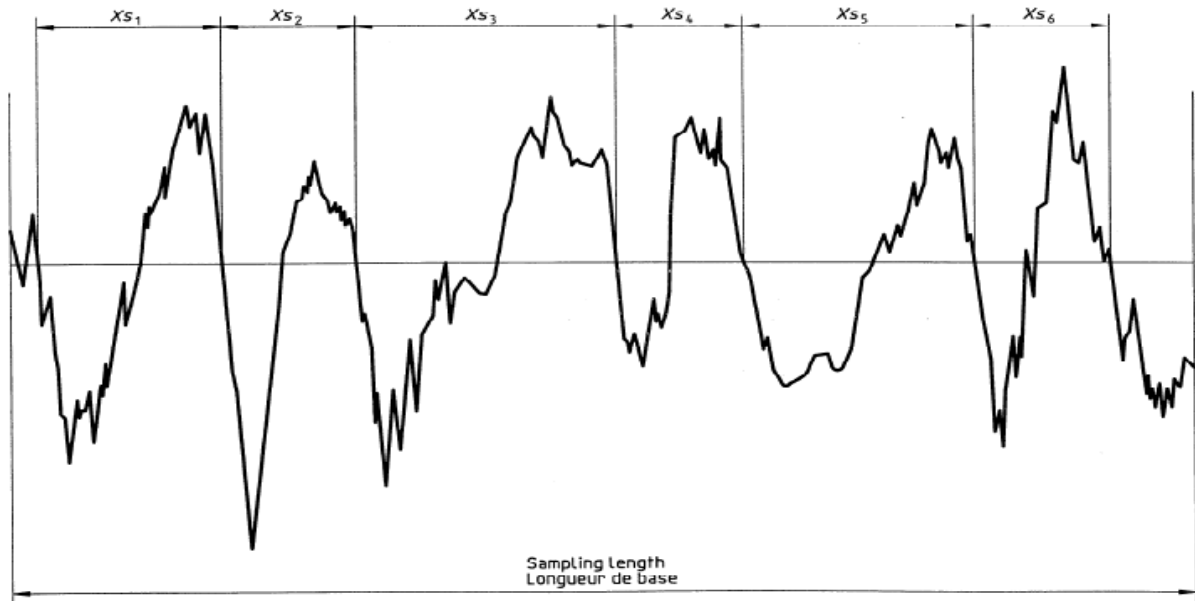


Figure (4.6) : Largeur des éléments du profil

Les paramètres PSm , RSm , WSm nécessitent une discrimination de hauteur et d'espacement. Sauf spécification contraire, la discrimination de hauteur par défaut doit être de 10 % de Pz , Rz , Wz respectivement, et la discrimination d'espacement par défaut doit être de 1 % de la longueur de base. Les deux conditions doivent être respectées.

II.1.4. Paramètres hybrides

1. Pente quadratique moyenne du profil évalué $P\Delta q$, $R\Delta q$, $W\Delta q$

Valeur quadratique moyenne des pentes locales dZ/dX , à l'intérieur de la longueur de base

II.1.5. Courbes et paramètres associés

Toutes les courbes et les paramètres qui y sont associés sont définis sur la longueur d'évaluation plutôt que sur la longueur de base, afin d'obtenir des courbes et des paramètres associés ayant une plus grande stabilité.

1. Taux de longueur portante $Pmr(c)$, $Rmr(c)$, $Wmr(c)$

Rapport de la longueur portante du profil a un niveau donne c , $MI(c)$, a la longueur d'évaluation

$$Pmr(c), Rmr(c) = \frac{MI(c)}{ln} \quad (4.7)$$

2 . Courbe du taux de longueur portante du profil (Courbe d'Abbott Firestone)

Courbe représentant le taux de longueur portante du profil en fonction du niveau, figure (4.7). Cette courbe peut être interprétée comme la fonction de distribution cumulée des ordonnées $Z(x)$ a l'intérieur de la longueur d'évaluation.

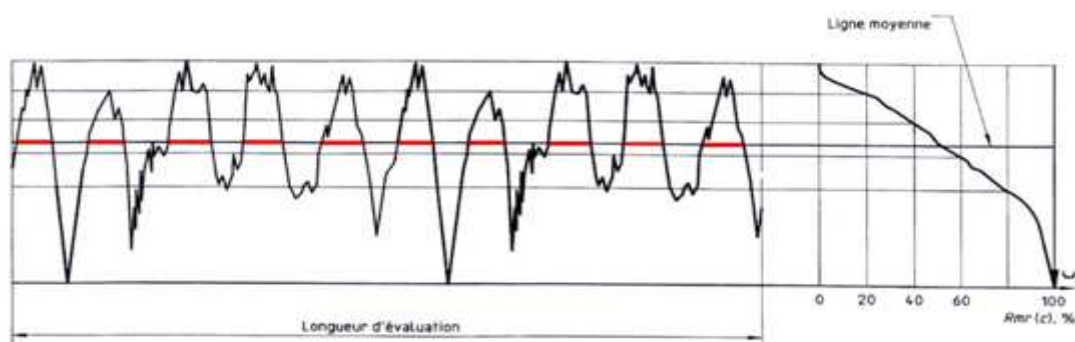


Figure (4.7) : courbe du taux de longueur portante

3. Différence de hauteur de coupe du profil $P\delta c$, $R\delta c$, $W\delta c$

Distance verticale entre deux niveaux de coupe d'une courbe du taux de longueur portante

$$R\delta c = C(Rmr1) - C(Rmr2) \text{ avec } (Rmr1 < Rmr2) \quad (4.8)$$

4. Taux de longueur portante relatif Pmr , Rmr , Wmr

Taux de longueur portante déterminé pour un niveau de coupe, a une hauteur $R\delta c$ par rapport à une référence $C0$

$$Rmr, Pmr, Wmr = Rmr, Pmr, Wmr (C1) \quad (4.9)$$

avec $C1 = C0 - R\delta c$

$$C0 = C(Pmr0, Rmr0, Wmr0)$$

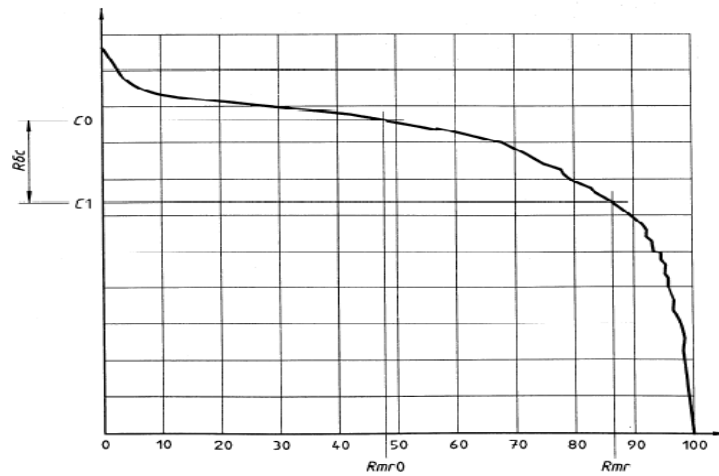


Figure (4.8) Taux de longueur portante relatif

5 .Courbe de distribution d'amplitude

Fonction représentant la distribution des ordonnées $Z(x)$ à l'intérieur de la longueur d'évaluation, figure (4.9).

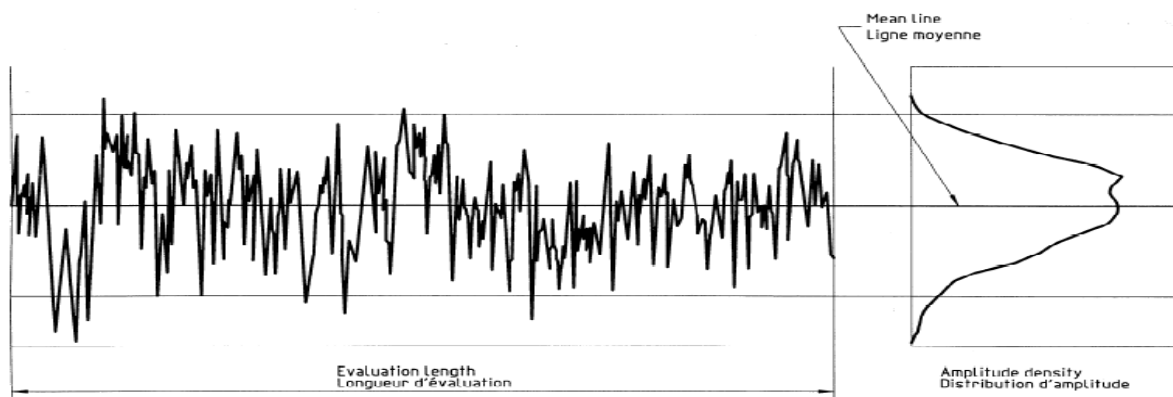


Figure (4.9) Courbe de distribution d'amplitude

II.2. Paramètres définis par rapport à la courbe de portance

Les paramètres sont déterminés à partir de la représentation linéaire de la courbe de taux de longueur portante (courbe d'ABBOTT) qui décrit l'augmentation du taux de longueur portante en fonction de l'augmentation de la profondeur du profil de rugosité.

La détermination des paramètres nécessite le calcul de la droite équivalente. Cette droite est calculée à partir de la zone centrale de la courbe de taux de longueur portante, incluant 40 % de tous les points du profil mesuré. Cette zone centrale se situe à l'endroit où la sécante de la courbe de taux de longueur portante, qui intercepte un arc représentant 40 % de la longueur portante, à la pente la plus faible. Le tableau (4.1) présente les définitions des paramètres définis par rapport à la courbe de portance.

Les paramètres Rpk et Rvk caractérisent respectivement les zones de rodage et de lubrification. Ces paramètres définis sur le profil de rugosité non filtré, tel que celui défini pour la détermination des paramètres liés aux motifs, sont appelés Rke , $Rpke$, $Rvke$, $Mr1e$ et $Mr2e$.

Tableau (4.1) Définition des paramètres liés à la courbe de portance

Intitulé	Définition	Paramètre de rugosité
Profondeur du profil écrêté	Profondeur de la partie centrale du profil de rugosité	Rk
Hauteur des pics éliminés	Hauteur moyenne des pics saillants, situés au-dessus du profil écrêté	Rpk
Hauteur des creux éliminés	Hauteur moyenne des creux, situés au-dessous du profil écrêté	Rvk
Taux de longueur portante $Mr1$	Taux, en pour-cent, déterminé sur la ligne de coupure qui sépare les pics saillants du profil écrêté	$Mr1$
Taux de longueur portante $Mr2$	Taux, en pour-cent, déterminé sur la ligne de coupure qui sépare les creux profonds du profil écrêté	$Mr2$

Ces paramètres sont destinés à faciliter l'évaluation du comportement fonctionnel des surfaces soumises à de fortes contraintes mécanique.

Ils sont aussi destinés à faciliter l'évaluation du comportement tribologique et à maîtriser le procédé de fabrication. Les paramètres sont issus des régions linéaires de la courbe de

probabilité de matière, qui constitue la représentation gaussienne de la courbe du taux de longueur portante.

II.3. Paramètres définis par rapport aux motifs

On appelle motif de profil une portion de profil comprise entre deux pics. Il est caractérisé par sa largeur ou pas et par la profondeur de chacun de ses côtés. Les paramètres liés aux motifs peuvent être évalués graphiquement en traçant la ligne enveloppe supérieure et la ligne enveloppe inférieure, en ne descendant pas dans les creux de pas inférieur à $500\ \mu\text{m}$ (figure 10). La profondeur moyenne de rugosité R représente la distance moyenne entre les deux courbes enveloppes. La ligne enveloppe supérieure permet l'évaluation de la profondeur moyenne d'ondulation W , et de son pas moyen AW [5].

Ces motifs déterminent la profondeur moyenne de rugosité R et son pas moyen AR . Les pics retenus sont les extrémités des motifs caractéristiques.

La ligne enveloppe supérieure est la ligne joignant ces pics caractéristiques. Elle permet de déterminer les motifs d'ondulation et de calculer la profondeur moyenne d'ondulation W et son pas moyen AW .

II.3.1. Définition des termes

- **Saillie locale du profil** : partie du profil comprise entre 2 minima adjacents du profil.
- **Creux local du profil** : partie du profil comprise entre 2 maxima adjacents du profil.
- **Motif** : portion du profil primaire comprise entre les points les plus hauts de 2 saillies locales du profil, consécutives ou non. Un motif est caractérisé par une longueur et 2 hauteurs.
- **Motif de rugosité** : motif calculé en utilisant l'opérateur théorique avec la valeur A . Par définition, un motif de rugosité a une longueur AR inférieure ou égale à A (figure 4.10).

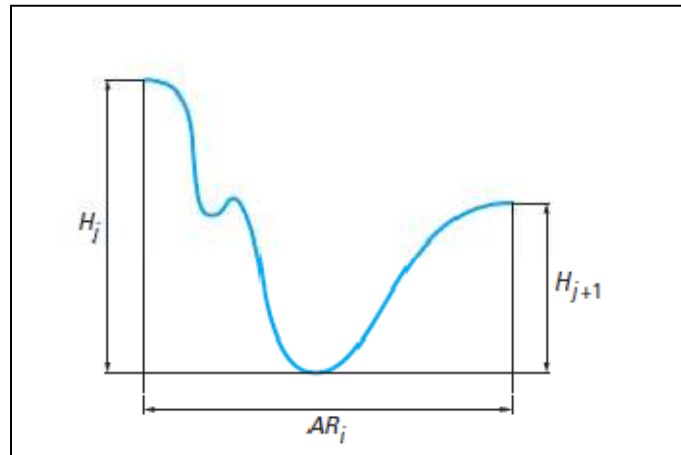


Figure (4.10) : motif de rugosité [5]

- **Ligne enveloppe supérieure du profil primaire** : segments de droite joignant les points les plus hauts des saillies du profil, après discrimination conventionnelle de certaines saillies (figure 4.11).

- **Motif d'ondulation** : motif déterminé sur la ligne enveloppe supérieure du profil primaire en utilisant l'opérateur théorique avec la valeur B (figure 4.11).

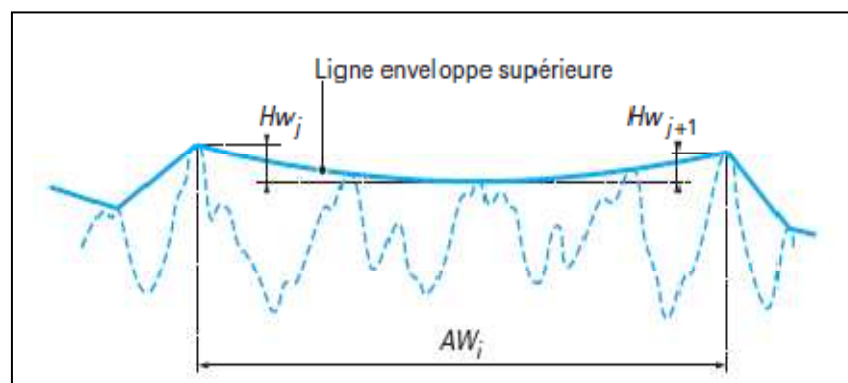


Figure (4.11) : motif d'ondulation [5]

II.3.2. Définition des paramètres liés aux motifs

1. Pas moyen des motifs : Moyenne arithmétique des longueurs des motifs

$$AR = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n AR_i \quad (4.11)$$

Avec n : nombre de motif de rugosité.

2. Profondeur moyenne des motifs : Moyenne arithmétique des profondeurs des motifs

$$R = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m H_j \quad (4.12)$$

Avec m : nombre de H_j

3. Profondeur maximale d'une irrégularité de profil : Plus grande des profondeurs

$Rx = \text{plus grand des } H_j$

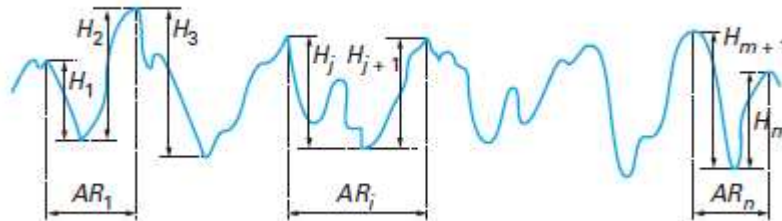


Figure (4.12) : Paramètres de rugosité définis par rapport aux motifs [5]

III. Paramètres surfaciques 3D d'états de surface

III.1. Généralités

Les paramètres surfaciques s'écrivent avec la lettre majuscule S (ou V) suivie d'un suffixe de une ou deux lettres minuscules. Ils sont calculés sur la surface entière et non plus comme pour les paramètres 2D par moyenne d'estimateurs calculés sur plusieurs longueurs de base. Le nom du paramètre surfacique ne reflète pas le contexte de filtrage comme en 2D. Par exemple, on aura toujours Sa quelle que soit la surface, alors qu'en 2D il y avait Pa , Ra ou Wa selon que le profil était primaire, de rugosité ou d'ondulation.

III.2. Paramètres de hauteur

Ces paramètres ne quantifient que l'axe z perpendiculaire à la surface :

Tableau (4.2) : paramètre surfacique de hauteur 3D

Paramètre	Description
Sq	hauteur moyenne quadratique (écart-type de la distribution des hauteurs)
Ssk	facteur d'asymétrie de la distribution des hauteurs
Sku	facteur d'aplatissement de la distribution des hauteurs
Sp	hauteur maximale des pics
Sv	profondeur maximale des vallées
Sz	hauteur totale de la surface
Sa	hauteur moyenne arithmétique

III.3. Paramètres spatiaux

Ces paramètres quantifient les informations latérales présentes sur les axes x et y de la surface.

Tableau (4.3) : paramètre surfacique spatiaux 3D

Paramètre	Description
Sal	longueur d'auto-corrélation
Str	rapport d'aspect de la texture
Std	direction principale de la texture

III.4. Paramètres hybrides

Ces paramètres combinent les informations présentes sur les trois axes x, y et z de la surface.

Tableau (4.4) paramètre surfacique hybrides 3D

Paramètre	Description
Sdq	gradient moyen quadratique
Sdr	aire développée

III.5. Paramètres fonctionnels

Ces paramètres sont calculés à partir de la courbe d'Abbott-Firestone obtenue par intégration de la distribution des hauteurs sur toute la surface.

Tableau (4.5) : paramètre surfacique fonctionnels 3D

Paramètre	Description
Smr	Taux de portance
Smc	profondeur de taux de portance
Sxp	hauteur des pics principaux
Vm	volume de matière
Vv	volume de vide
Vmp	volume de matière des pics
Vmc	volume de matière du cœur
Vvc	volume de vide du cœur
Vvv	volume de vide des vallées

III.6. Paramètres liés à la segmentation

Ces paramètres sont issus d'une segmentation de la surface en motifs (bassins versants et collines). La segmentation utilise la méthode dite de « la ligne de partage des eaux.

Tableau (4.6) : paramètre surfacique liés à la segmentation 3D

Paramètre	Description
Spd	densité des pics significatifs
Spc	courbure moyenne des pics significatifs
S10z	hauteurs des 10 points principaux
S5p	hauteur des 5 principaux pics
S5v	hauteur des 5 principales vallées
Sda	aire des bassins versants fermés
Sha	aire des collines fermées
Sdv	volume des bassins versants fermés
Shv	volume des collines fermées

IV. Estimation des paramètres [13]

IV.1 Paramètres définis sur la longueur de base

IV.1.1 Estimateur d'un paramètre

L'estimateur de la valeur d'un paramètre est calculé avec les données de mesurage obtenues sur une seule longueur de base.

IV.1.2. Estimateur moyen d'un paramètre

L'estimateur moyen d'un paramètre est calculé en faisant la moyenne arithmétique des estimateurs du paramètre obtenus sur toutes les longueurs de base individuelles.

Lorsque la valeur conventionnelle de cinq longueurs de base est utilisée pour les paramètres du profil de rugosité, il n'est pas besoin d'ajouter de suffixe au symbole de base. Pour un paramètre évalué sur un nombre de longueurs de base différent de cinq, ce nombre doit être ajouté comme suffixe au symbole du paramètre (par exemple Rz_l , Rz_3).

IV.2 Paramètres définis sur la longueur d'évaluation

Pour les paramètres définis sur la longueur d'évaluation (P_t , R_t et W_t), un estimateur de la valeur du paramètre est calculé avec les données de mesurage obtenues sur une longueur d'évaluation comprenant le nombre normalisé de longueurs de base.

IV.3. Courbes et paramètres associés

Pour les courbes et paramètres associés, un estimateur de la valeur du paramètre est calculé avec les données de mesure de la courbe en question, tracée pour une longueur d'évaluation.

V. Conclusion

Il est bien connu que les définitions des paramètres devraient être non ambiguës pour éviter d'être ouvertes d'interprétation différente par des utilisateurs et des lotisseurs de logiciel de métrologie. Ce qui n'est pas aussi bien connu est que les paramètres devraient également

avoir des définitions stables ou robustes pour qu'ils reflètent les propriétés véritables d'une surface. ici une définition de paramètre est considérée mathématiquement comme sensible si un petit changement du profil implique un petit changement de la valeur de paramètre.

CHAPITRE 5

Mesurage et résultats

I. But :

Notre objectif est d'exploiter le fichier de mesure obtenue avec l'appareil TESA Rugosurf 10G pour calculer les différents paramètres d'état de surface indiqués par l'appareil suivant les normes ISO 4287 et ISO 4288, et de déterminer d'autres paramètres non indiqués par l'appareil mais ils sont définis par la norme utilisée ou par des projets de norme. Le calcul s'effectue en programmation Matlab.

II. Les conditions de mesure

Les essais de mesures sont effectués dans les conditions environnantes du local suivantes :

- Temperature : $T = 25^\circ$
- Pression = pression atmosphérique
- Humidité : ?

III. Réglage de l'appareil

Avant de commencer le mesurage de rugosité il faut faire le pré-réglage de l'appareil.

1. Sélection d'un cut-off

On a utilisé un cut-off de 0.8 mm

la longueur totale l_t dépend du cut-off sélectionné.

Donc $l_t = (\text{nombre de cut-off} + 1) \times \lambda_c = (5 + 1) \times 0.8 = 4.8 \text{ mm}$



Figure (5.1) : sélection de la longueur de cut-off

2. Sélection du nombre de cut-off

Nous avons sélectionné 5 cut-off pour notre essai.



Figure (5.2) : sélection de nombre du cut-off

On peut changer l'étendue en sélectionnant le nombre de cut-off à utiliser pour la mesure. Ce nombre est compris entre 2 et 10.

3. Réglage de la longueur d'évaluation

Pour le mesurage du profil de rugosité, la longueur d'évaluation comprend 5 longueur de base.

$$L_n = \text{nombre de cut-off} \times \lambda_C = 5 \times 0.8 = 4\text{mm}$$

4. Vérification de la position du palpeur

Cette option nous permet de vérifier la position correcte du palpeur par rapport à la surface à explorer. Elle est très utile dans les deux cas suivants :

- Lorsque nous effectuons des mesures dans des gorges ou des alésages. Cette option sert à empêcher le palpeur de se déplacer jusqu'à la limite de la zone de mesure alors

que le corps du palpeur est en contact avec la surface explorer.

- Lorsque nous effectuons des mesures sur des surfaces critiques. Elle sert alors à positionner correctement le palpeur sur des surfaces concaves ou convexes [12].

5. Etalonnage

Il existe plusieurs types d'étalons qui peuvent faire l'étalonnage dans des bonnes conditions, pour réduire les défauts d'amplitudes et de périodes.

On a utilisé l'étalon fournie avec l'appareil de $Ra=2.970 \mu m$



Figure (5.3) : Choix de spécimen d'étalonnage

Les conditions d'étalonnage sont :

- Cut-off = 2.5
- N° du cut-off= 3
- N° de mesure a médier = 3



Figure (5.4) : opération d'étalonnage dans le labo de métrologie

On trouve la valeur de $R_a = 2.945 \mu\text{m}$, d'après cette valeur on peut dire que l'étalonnage est réussi parce que la valeur R_a est proche de la valeur de spécimen.

IV. Mesure des paramètres du profil de rugosité

Si la direction de mesurage n'est pas spécifiée, la pièce doit être positionnée de sorte que la direction de la section corresponde aux valeurs maximales des paramètres de hauteur de rugosité de surface (R_a , R_z). Cette direction sera normale à la direction des irrégularités de la surface à mesurer. Pour des surfaces isotropes, la direction de la section peut être arbitraire [8].

Les mesurages doivent être effectués sur la partie de la surface sur laquelle les valeurs critiques peuvent être escomptées. Cela peut être déterminé par examen visuel. Des mesurages séparés doivent être également répartis sur cette partie de la surface pour obtenir des résultats indépendants.

Pour déterminer les valeurs des paramètres du profil de rugosité, il convient en premier lieu d'examiner la surface pour déterminer si le profil de rugosité est périodique ou non.

IV.1. Principe de mesurage

- Le capteur se déplace à vitesse constante le long du profil.
- Les variations de hauteur du capteur sont enregistrées et transformées en grandeurs électriques.
- Ces grandeurs électriques sont ensuite traitées par le calculateur.
- Les informations traitées peuvent ensuite être affichées et enregistrées.

La figure ci-dessous illustre le principe de mesurage de TESA Rugosurf 10G.

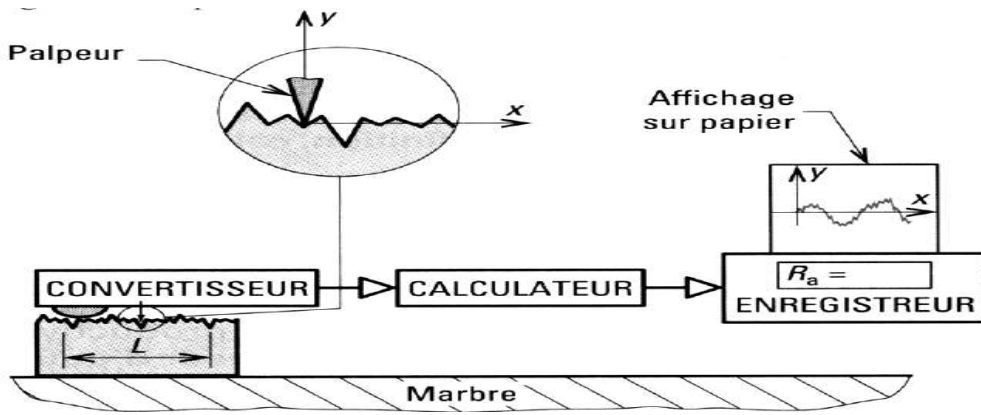


Figure (5.5) : Principe de mesure

IV.2. Affichage des résultats de mesure

Pour afficher les résultats de mesure on utilise le logiciel Rugosoft 10 fournie avec l'appareil de mesure.

Voici l'interface de logiciel Rugosoft 10-10G :

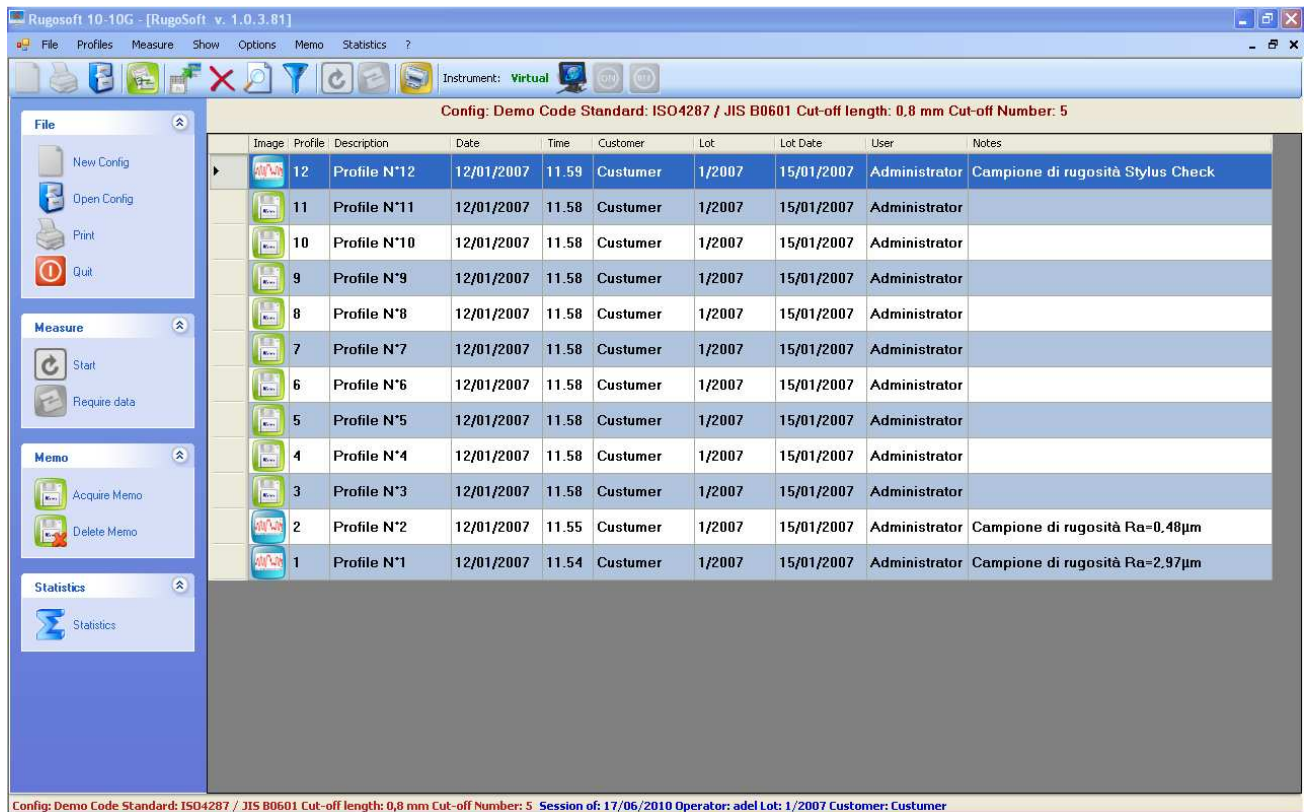


Figure (5.6) : interface de rugosoft 10-10G

IV.3. Résultats de mesurage

Les paramètres obtenus par le rugosimètre sont mesurés suivants plusieurs normes : ISO 4287, DIN 4776, ISO 12085, ISO 13565, PrEN 10049, DB N31007. Mais nous utilisons dans ce travail seulement les normes ISO 4287 et IOS 4288.

IV.3.1 Profil primaire

La figure ci-dessous représente le Profil primaire. Il est issu du profil brut après l'application du filtre de longueur d'onde courte λ_s

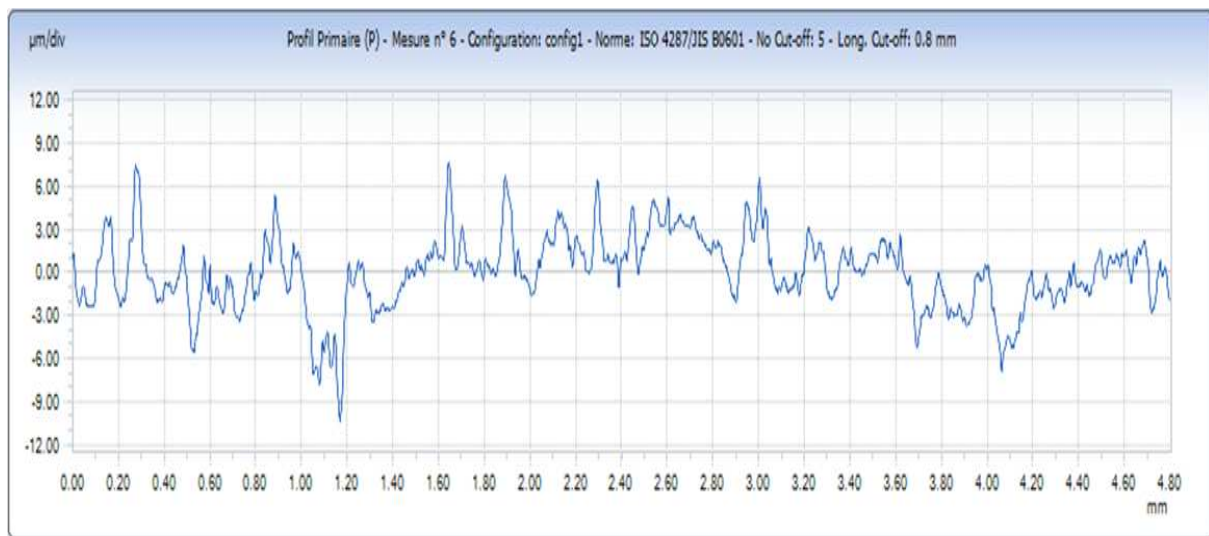


Figure (5.7) : Profil primaire suivant la norme ISO 4287

Tableau (5.1) paramètres P suivant ISO 4287

Paramètre	Valeur	Tolérance -	Tolérance +
P_a	1.952 μm	0.000	100.000
P_q	2.564 μm	0.000	100.000
P_t	17.963 μm	0.000	100.000
P_p	7.631 μm	0.000	100.000
P_v	10.305 μm	0.000	100.000
P_c	5.507 μm	0.000	100.000
P_{sm}	172 μm	0	10 000
$P_{\delta c}$	17.963 μm	0.000	100.000
PP_c	44/cm	0	1000

IV.3.2. Profil de la rugosité

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

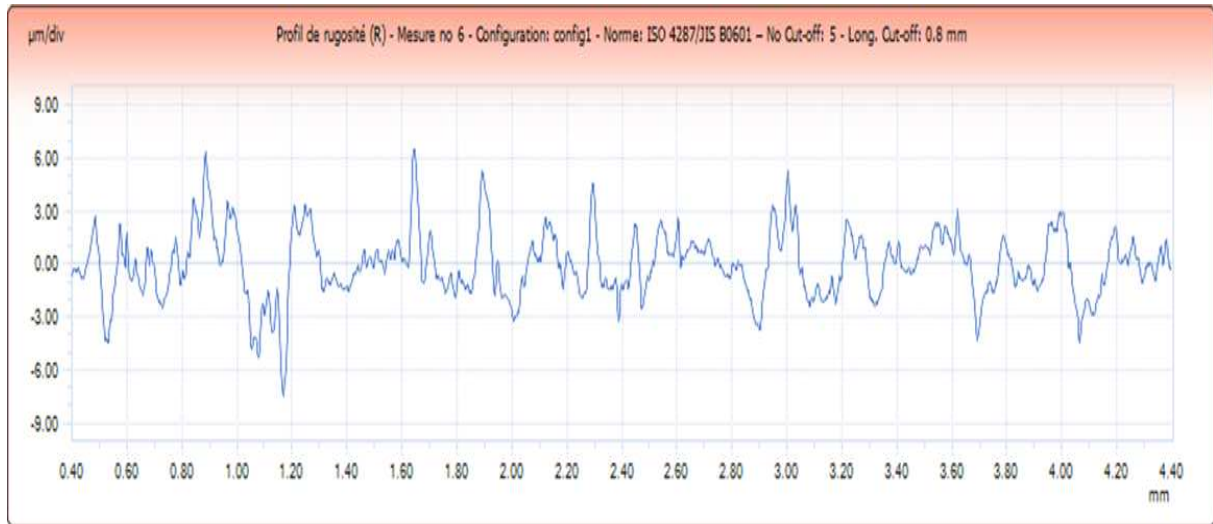


Figure (5.8) : Profil du rugosité suivant la norme ISO 4287

Tableau (5.2) : paramètres R suivant la norme ISO 4287

Paramètre	Valeur	Tolérance -	Tolérance +
R_a	1.431 μm	0.000	100.000
R_q	1.829 μm	0.000	100.000
R_t	14.014 μm	0.000	100.000
R_p	5.148 μm	0.000	100.000
R_v	4.234 μm	0.000	100.000
R_z	9.382 μm	0.000	100.000
R_c	3.747 μm	0.000	100.000
R_{sm}	108 μm	0.000	10 000
$R\delta_c$	14.014 μm	0	100.000
RP_c	73/cm		1000

Tableau (5.3) : paramètres de rugosité de base R3z suivant la norme DIN/DB(Daimler Benz) N31007

Paramètre	Valeur	Tolérance -	Tolérance +
R_{max}	13.795 μm	0.000	100.000
R_{3z}	5.815 μm	0.000	100.000
R_{3zm}	8.041 μm	-	-

Tableau (5.4) : paramètres mesurés par rapport aux courbe de portante suivant la norme ISO 13565 R/Jis B0671

Paramètre	Valeur	Tolérance -	Tolérance +
R_k	0.843 μm	0.000	100.000
R_{pk}	2.495 μm	0.000	100.000
R_{vk}	0.085 μm	0.000	100.000
$Mr1$	36.8 %	0	100
$Mr2$	94.8 %	0	100

IV.3.3. Courbe de taux de longueur portante Rmr

Le Taux de longueur portante Rmr (tp dans la norme ASME) est le rapport entre la longueur du profil de rugosité et la longueur d'évaluation à un niveau donné C.

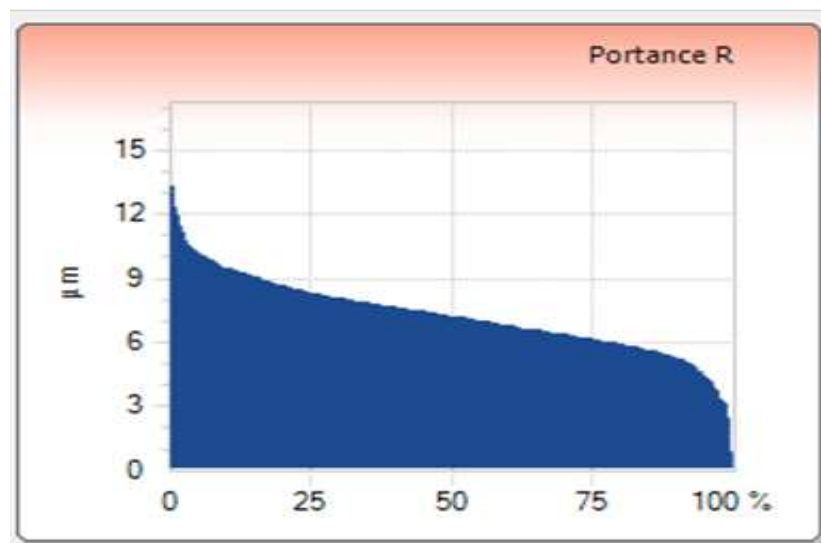


Figure (5.9) : courbe de longueur portante Rmr (courbe d'Abbott Fierestone)

IV.3.4. Courbe de distribution d'amplitude

C'est une fonction représentante la distribution des ordonnées $Z(x)$ à l'intérieure de la longueur d'évaluation.

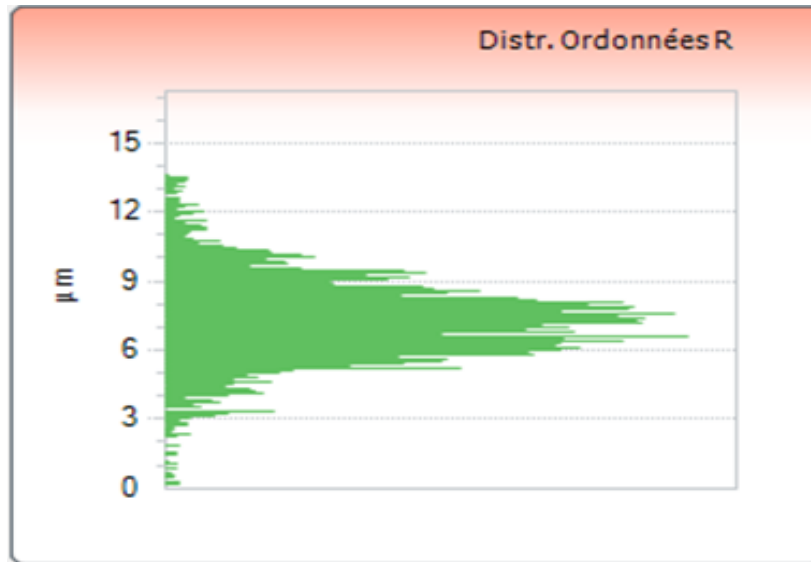


Figure (5.10) : Courbe de distribution d'amplitude

V. Résultats du programme de calcul et interprétations :

on a réalisé quelques programmes de calcul en utilisant le logiciel de programmation Matlab 7.0 dont le but de calculer les paramètres d'état de surface en utilisant les fichiers numérique ZYRoug6.csv et ZYRaw6.csv, récupéré de l'appareil.

Les résultats finaux nous permettent de déterminer les caractéristiques d'états de surface en 2D, et les comparer avec les résultats de Rugosurf 10G.

V.1. Profil primaire :

En exportant le fichier ZYRaw6.csv au Matlab et en exécutant notre programme, après le calcul on obtient les résultats suivants :

Note : d'après la norme ISO 4287 la longueur de base du profil primaire, l_p , est égale à la longueur d'évaluation . $l_p = l_n = 4 \text{ mm}$

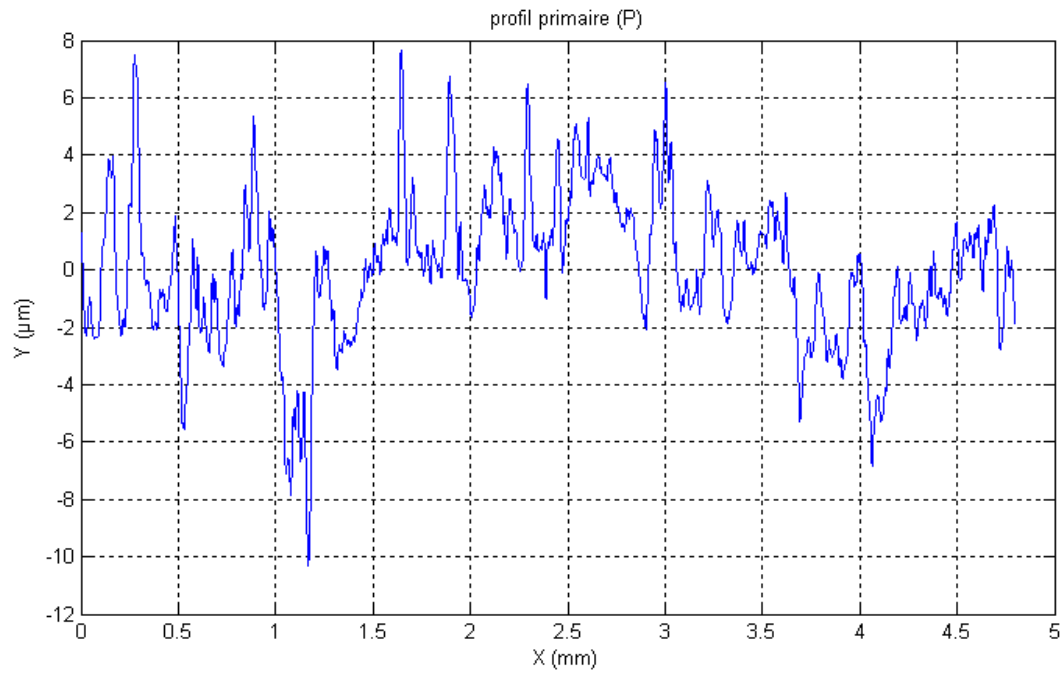


Figure (5.11) : Représentation graphique du profil primaire (P)

V.1.1. Paramètres d'amplitudes (saillie et creux) :

Tableau (5.5) : Paramètres P d'amplitude (saillie et creux)

Paramètre	Valeur
P_p	7.6310 μm
P_v	10.3050 μm
P_z	17.9360 μm
P_t	17.9360 μm
P_c	4.4469 μm

V.1.2. Paramètres d'amplitude (moyenne des ordonnées)

Tableau (5.6) : paramètres d'amplitude (moyenne des ordonnées)

Paramètre	Valeur
Pa	1.6948 μm
Pq	2.4254 μm
Psk	-0.4157 μm
Pku	4.4488 μm

La valeur de Psk est négative ce qui signifie que le profil primaire présente plus de creux que de pic donc la distribution des hauteurs n'est pas symétrie.

On constate aussi que la valeur de Pku est supérieure de 3 ce qui expliqué par le resserrage de la distribution autour de la médiane.

V.1.3. Calcul les Paramètres hybrides du profil primaire :

- **Pente quadratique moyenne du profil évalué $P\Delta q$**

C'est la valeur quadratique moyenne des pentes locales dZ/dX , à l'intérieure de la longueur de base.

Pour calculer la pente quadratique moyenne $P\Delta q$, il faut calculer la pente locale.

- **Calcul la pente locale dZ/dX**

dZ/dX c'est la pente du profil évalué à un point x_i

La valeur numérique de la pente locale, et donc le paramètre $P\Delta q$, dépend étroitement du pas ΔX .

$$\Delta X = X_{i+1} - X_i = 0.0020 \text{ mm}$$

D'après la norme ISO 4287 la pente locale peut être estimée par la formule :

$$\frac{dZ_i}{dX} = \frac{1}{60\Delta X} (Z_{i+3} - 9Z_{i+2} + 45Z_{i+1} - 45Z_{i-1} + 9Z_{i-2} - Z_{i-3})$$

Ou Z_i est la hauteur du $i^{\text{ème}}$ point du profil et ΔX le pas entre deux points adjacents du profil. Il convient d'utiliser la formule ci-dessus pour le pas d'échantillonnage spécifiée dans l'ISO 3274 en fonction du filtre utilisé.

$$P\Delta q = -0.2295 \mu\text{m}$$

V.1.4. Paramètres d'espacement Psm :

Psm c'est la valeur moyenne des largeurs des éléments du profil Xs , à l'intérieure d'une longueur de base.

$$Psm = \frac{1}{m} * \sum_i^m Xs_i = 129.6 \mu\text{m}$$

V.1.5. Courbes et paramètres associés

- **Taux de longueur portante relatif**

Le niveau de coupe c est la distance verticale entre la ligne de calcul et une référence donnée $Cr_{\text{éf}}$. La courbe du taux de longueur portante représente le taux de longueur portante du profil en fonction du niveau de coupe c .

On a choisis le niveau de référence $Cr_{\text{éf}}$ le point ou la hauteur du profil est maximum.

Chaque fois on change C de $Cr_{\text{éf}}$ jusqu'à le point le plus bas dans le profil primaire, les résultats obtenus sont données dans le tableau (5.7).

Tableau (5.7) : Pmr en fonction de niveau de coupe c

C	0	1	2	3	4	5	6	7	8
Mlc	0	0.0361	0.0805	0.1600	0.3550	0.6618	1.0902	2.9189	3.2557
Pmr	0	0.0075	0.0168	0.0333	0.0740	0.1379	0.2272	0.6084	0.6744
%Pmr	0	0.7528	1.6787	3.3349	7.3395	13.7942	22.7212	60.8360	67.4389

9	10	11	12	13	14	15	16	17	17.936
3.8045	4.2219	4.5430	4.6379	4.6868	4.7211	4.7657	4.7782	4.7864	4.798
0.7929	0.8799	0.9469	0.9666	0.9768	0.9840	0.9933	0.9959	0.9976	1
79.2942	87.9921	94.6861	96.6628	97.6820	98.3971	99.3267	99.5865	99.7573	100

La figure (5.12) représente la courbe de taux de longueur portante du profil primaire

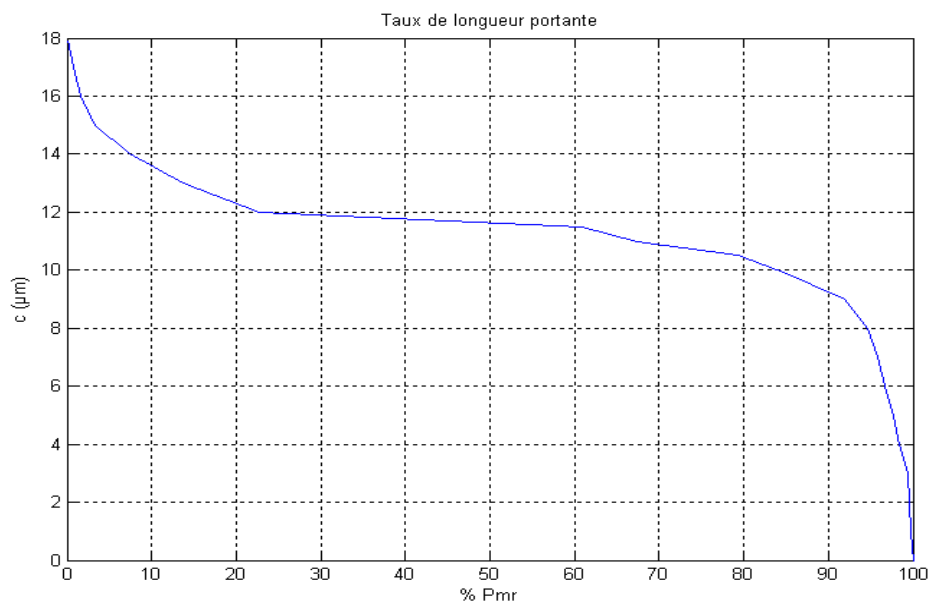


Figure (5.12) : Taux de longueur portante Pmr.

- **Différence de hauteur de coupe du profil Rδc**

C'est la distance verticale entre deux niveaux de coupe d'une courbe de taux de longueur portante.

D'après la relation (4.8)

$$R\delta c = C(Rmr1) - C(Rmr2) \quad \text{avec } (Rmr1 < Rmr2)$$

On prend $Rmr1=0\% \Rightarrow C1=17.936$

$$Rmr2= 100\% \Rightarrow C2=0$$

$$R\delta c = C1 - C2 = 17.936 \mu\text{m}$$

V.2. Calcul les paramètres du profil de rugosité

En utilisant le fichier data zyrough6.csv on obtient les résultats suivants :

- Profil de rugosité :

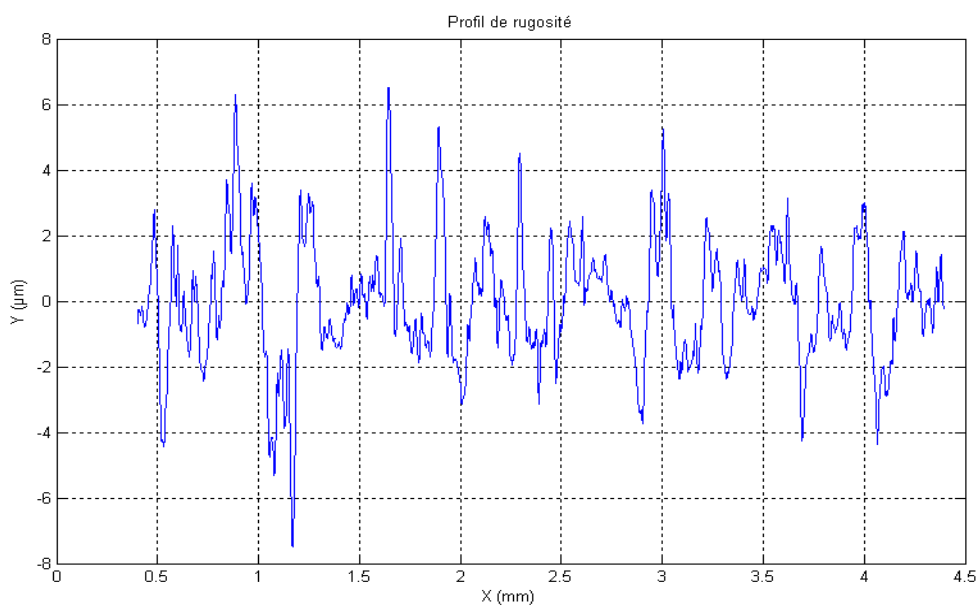


Figure (5.13) : Représentation graphique du profil de rugosité

V.2.1. Paramètres d'amplitude (saillie et creux) :

Tableau (5.8) : Paramètres d'amplitude (saillie et creux)

	1 ^{er} cut-off	2 ^{ème} cut-off	3 ^{ème} cut-off	4 ^{ème} cut-off	5 ^{ème} cut-off
<i>Rp_i</i>	6.3060	6.5250	4.5160	5.2460	3.1480
<i>Rv_i</i>	7.4890	1.8710	3.1560	3.7360	4.3780
<i>Rz_i</i>	13.7950	8.3960	7.6720	8.9820	7.526
<i>Rc_i</i>	4.2934	3.4566	3.0052	3.2878	2.5793
<i>Rt_i</i>	11.0780	7.5850	7.6720	7.6280	4.7950

Donc la hauteur maximale de saillie du profil de rugosité ,

$$Rp = \frac{1}{5} \sum_{i=1}^5 Rp_i = 5.1482 \mu m$$

la profondeur maximale de creux du profil de rugosité Rv ,

$$Rv = \frac{1}{5} \sum_{i=1}^5 Rv_i = 4.1260 \mu m$$

la hauteur maximale Rz ,

$$Rz = \frac{1}{5} \sum_{i=1}^5 Rz_i = 9.2742 \mu m$$

La hauteur moyenne des éléments du profil Rc

$$Rc = \frac{1}{5} \sum_{i=1}^5 Rc_i = 3.3245 \mu m$$

La hauteur totale du profil Rt ,

$$Rt = \frac{1}{5} \sum_{i=1}^5 Rt_i = 14.014 \mu m$$

V.2.2. Paramètres d'amplitude (moyenne des ordonnées) :

Tableau (5.9) : Paramètres d'amplitude (moyenne des ordonnées)

	1 ^{er} cut-off	2 ^{ème} cut-off	3 ^{ème} cut-off	4 ^{ème} cut-off	5 ^{ème} cut-off
Rai	1.9466	1.3595	1.1638	1.4438	1.2441
Rqi	6.3737	3.4007	2.0865	3.0724	2.5045
Rski	-0.6570	1.6570	0.3363	0.2833	-0.6599
Rkui	3.2618	4.8413	3.0924	2.6028	2.9144

Ra(μm)	Rq(μm)	Rsk(μm)	Rku(μm)
1.4316	1.8297	0.1919	3.3425

La valeur de Rsk est positive ce qui signifie que cette surface présente plus de pic que des creux.

La valeur de Rku renseigne sur l'aplatissement de la courbe de distribution des hauteurs, lorsque les motifs de la rugosité (pics, creux) sont larges et leurs extrémités peu éloignées de la ligne moyenne alors $Rku > 3$, c'est notre cas, et la distribution est resserrée autour de la médiane

En générale, le facteur d'asymétrie et le facteur d'aplatissement du profil évalué varient simultanément.

V.2.3. Paramètres d'espacement

Tableau (5.10) : les valeurs des Paramètres d'espacement

	1 ^{er} cut-off	2 ^{er} cut-off	3 ^{er} cut-off	4 ^{er} cut-off	5 ^{er} cut-off
Rsmi (mm)	0.0819	0.0701	0.0855	0.1335	0.0790

$$Rsm = \frac{1}{5} \sum_{i=1}^5 Rsm_i = 0.090 \text{ mm}$$

V.2.4. Paramètres hybrides

- **Pente quadratique moyenne du profil évalué $R\Delta q$**

C'est la valeur quadratique moyenne des pentes locales Dz/Dx , à l'intérieure de la longueur de base

Calcul la pente locale dZ/dX

dZ/dX c'est la pente du profil évalué à un point x_i

La valeur numérique de la pente locale, et donc les paramètres $R\Delta q$, dépend étroitement du pas ΔX .

$$\Delta X = X_{i+1} - X_i = 0.0020 \text{ mm}$$

La pente locale du profil de rugosité peut être estimée par la formule :

$$\frac{dZ_i}{dX} = \frac{1}{60\Delta X} (Z_{i+3} - 9Z_{i+2} + 45Z_{i+1} - 45Z_{i-1} + 9Z_{i-2} - Z_{i-3})$$

Ou Z_i est la hauteur du $i^{\text{ème}}$ point du profil de rugosité et ΔX est le pas entre deux points adjacents du profil. Il convient d'utiliser la formule ci-dessus pour le pas d'échantillonnage spécifiée dans l'ISO 3274 en fonction du filtre utilisé.

Tableau (5.11) les valeurs de $R\Delta q$ dans chaque longueur de base

	1 ^{er} cut-off	2 ^{er} cut-off	3 ^{er} cut-off	4 ^{er} cut-off	5 ^{er} cut-off
$R\Delta q_i$ (/mm)	4.0157	-7.4474	3.8552	0.8182	-1.0524

Après le calcul on trouve la valeur de $R\Delta q$ sur la longueur d'évaluation :

$$R\Delta q = \frac{1}{5} \sum_{i=1}^5 R\Delta q_i = 0.1893 \mu\text{m}$$

V.2.5. Courbes et paramètres associés :

- **Calcul de taux de longueur portante relatif**

Tableau (5.12) : M_l et le taux R_{mr} en fonction de niveau de coupe

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
M_l (C)	0.0224	0.0563	0.1169	0.3179	0.7298	1.432	2.2973	3.2187	3.7057
R_{mr}	0.0056	0.0141	0.0293	0.0795	0.1826	0.3583	0.5748	0.8054	0.9273
% R_{mr}	0.56	1.41	2.93	7.95	18.26	35.83	57.48	80.54	92.73

10	11	12	13	14	14.014
3.8643	3.9520	3.9760	3.9838	3.9958	3.9963
0.9670	0.9889	0.9957	0.9969	0.9999	1
96.70	98.89	99.57	99.69	99.99	100

La figure ci-dessous représente la courbe de taux de longueur portante du profil de rugosité, Cette courbe peut être interprétée comme la fonction de distribution cumulée des ordonnées

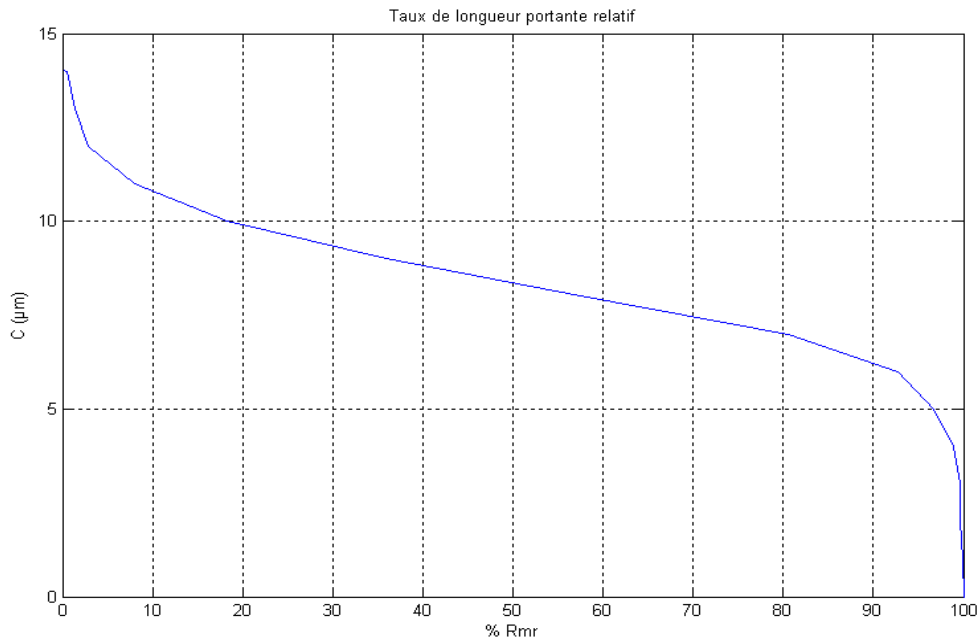


Figure (5.14) : Courbe d'Abbott Firestone (%Rmr)

La courbe d'Abbott permet d'estimer la capacité portante d'une surface. Le taux de portance est assimilable à la probabilité de contact entre la surface considérée et une surface parfaitement plane et lisse, connaissant leur distance de séparation. La représentation graphique choisie propose l'évaluation de la distribution des hauteurs adimensionnée en fonction de cette probabilité.

La large zone médiane de la courbe d'Abbott correspond à la partie fonctionnelle de la surface et possède une pente quasiment constante. Une valeur proche de zéro est recherchée en termes de performances. La pente varie dans de plus grandes proportions de part et d'autre de cette zone portante, définissant la zone des pics de la surface aux faibles probabilités de contact, et la zone des vallées lorsque la pente diminue de nouveau. La norme internationale ISO 13565-2 donne une procédure précise de délimitation de ces zones.

- **Différence de hauteur de coupe du profil $R\delta c$**

C'est la distance verticale entre deux niveaux de coupe d'une courbe du taux de longueur portante.

D'après la relation (4.8)

$$R\delta c = C(Rmr1) - C(Rmr2) \quad \text{avec } (Rmr1 < Rmr2)$$

On prend $Rmr1=0\% \Rightarrow C1=14.014$

$$Rmr2= 100\% \Rightarrow C2=0$$

$$R\delta c = C1 - C2 = 14.014 \mu\text{m}$$

V.2.6. Courbe de distribution d'amplitude :

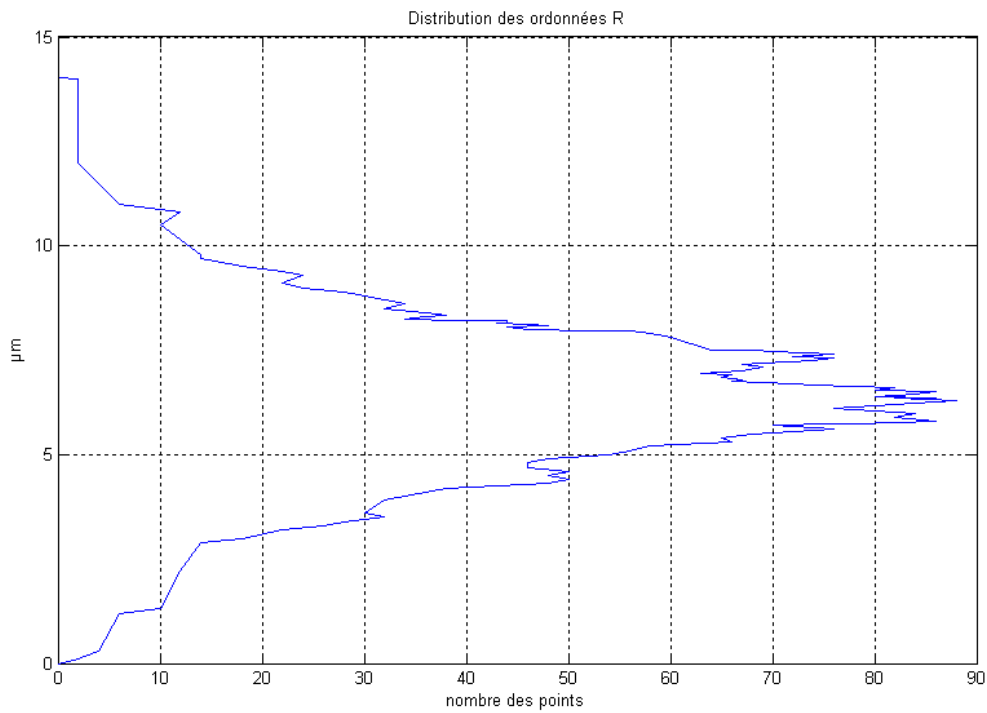


Figure (5.15) : Distribution des ordonnées du profil de rugosité

V.3. Paramètres définis par rapport aux motifs :

- Pas moyen des motifs : Moyenne arithmétique des longueurs des motifs

$$\text{D'après (4.11)} \quad AR = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n AR_i = 0.0458 \text{ mm}$$

Avec n : nombre de motif de rugosité.

- Profondeur moyenne des motifs : Moyenne arithmétique des profondeurs des motifs

D'après (4.12)

$$R = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m H_j = 3.3917 \mu\text{m} \quad \text{Avec } m : \text{nombre de } H_j$$

- Profondeur maximale d'une irrégularité de profil : Plus grande des profondeurs

$$R_x = \text{plus grand des } H_j = 8.6740 \mu\text{m}$$

V.4. Récapitulatif des résultats :

Tableau (5.13) : Paramètres calculés par rapport à la ligne moyenne			
Profil primaire		Profil de rugosité	
Pa	1.9529 μm	Ra	1.4316 μm
Pq	2.5641 μm	Rq	1.8297 μm
Pp	7.6310 μm	Rp	5.1994 μm
Pv	10.3050 μm	Rv	4.1260 μm
Pz	17.9360 μm	Rz	9.3254 μm
Pc	4.4469 μm	Rc	3.3612 μm
Pt	17.9360 μm	Rt	14.014 μm
Psk	-0.2273 μm	Rsk	0.0442 μm
Pku	3.9229 μm	Rku	0.3899 μm
P Δ q	-0.5488 μm	R Δ q	0.1893 μm
Psm	129.6 μm	Rsm	90 μm
P δ c	17.936 μm	R δ c	14.014 μm

Les paramètres suivants ne sont pas indiqués par l'appareil mais existent dans la norme utilisée. Il s'agit de : Pz, Psk, Pku, P Δ q, Rsk, Rku, R Δ q.

Les trois paramètres AR, R et Rx, ne sont ni définis dans la norme ISO 4287 ni indiqués par l'appareil. Nous les avons trouvés dans l'article de Techniques d'Ingénieur R1230.

V.5. Comparaison

On comparant les paramètres indiqués par l'appareil avec ceux que nous les avons calculés avec l'algorithme appliqué dans notre programme.

Tableau (5 .14) : Comparaison entre les paramètres indiqués par l'appareil et celles calculés par le programme

Profil primaire				Profil de rugosité			
Rugosimètre		programme		Rugosimètre		programme	
Pa	1.95 μm	Pa	1.95 μm	Ra	1.43 μm	Ra	1.43 μm
Pq	2.56 μm	Pq	2.56 μm	Rq	1.83 μm	Rq	1.83 μm
Pt	17.96 μm	Pt	17.94 μm	Rt	14 μm	Rt	14 μm
Pp	7.63 μm	Pp	7.63 μm	Rp	5.15 μm	Rp	5.20 μm
Pv	10.31 μm	Pv	10.31 μm	Rv	4.23 μm	Rv	4.13 μm
Pc	5.51 μm	Pc	4.45 μm	Rz	9.38 μm	Rz	9.33 μm
Psm	172 μm	Psm	130 μm	Rc	3.75 μm	Rc	3.36 μm
P δ c	17.96 μm	P δ c	17.94 μm	Rsm	108 μm	Rsm	90 μm
-	-	-	-	R δ c	14 μm	R δ c	14 μm

Nous remarquons que certains paramètres sont sous estimés, tel que la largeur moyenne des éléments du profil (Rsm, Psm), ceci est dû à l'ensemble des points dans chaque longueur de base ne présentant pas un élément du profil complet, ces points ne sont pas comptés par l'algorithme que nous avons appliqué.

La hauteur moyenne des éléments du profil (Pc, Rc) n'est pas identique à celle indiquée par l'appareil parce que ce paramètre nécessite une discrimination de hauteur et d'espacement, la discrimination de hauteur doit être de 10% de Pz, Rz respectivement, et la discrimination d'espacement doit être de 1% de la longueur de base, les deux conditions doivent être respectées.

Les autres paramètres sont presque identiques aux ceux indiqués par l'appareil, ceci signifie que l'algorithme que nous avons appliqué est validé.

à titre de vérification de l'influence de cut-off sur les résultats obtenus précédemment, nous avons fait plusieurs mesures sur un étalon N8-A de rugosité $R_a = 3.2\mu\text{m}$. On signale que d'après la norme ISO 4288 le choix du cut-off pour une rugosité située dans une plage de

[2-10] μm doit être égale à 2.5 mm. Les résultats obtenus sont présentés dans le tableau suivant :

Tableau (5.15) : les paramètres de rugosité en fonction de nombre du cut-off

	Le nbre de cut-off		
	2	3	5
Ra	2.229	2.405	2.696
Rq	2.682	2.957	3.113
Rp	5.098	6.094	5.532
Rv	5.890	6.917	6.41
Rz	10.988	13.011	11.942
Rc	5.909	4.492	6.294
Rt	11.762	15.572	13.197
Rsm	556	192	680

Nous remarquons que l'écart moyen arithmétique du profil de rugosité et l'écart moyen quadratique du profil (Ra, Rq) sont proportionnel au nombre du cut-off utilisé, c'est-à-dire si on augmente le nombre du cut-off Ra et Rq vont augmenter. Les autres paramètres aussi sont influés par le nombre du cut-off d'une façon aléatoire.

VI. Conclusion

Notre travail a porté sur l'évaluation de nombreux paramètres très difficiles à déterminer, nous avons pu calculer tous les paramètres indiqués par le rugosimètres TESA Rugosurf 10G selon la norme ISO 4287 et aussi nous avons arrivé à calculer des autres paramètres non indiqué par l'appareil que l'on trouve dans les normes ISO 4287, ISO 4288.

Conclusion générale

La difficulté à appréhender la rugosité vient du fait que c'est un paramètre statistique. Et du moment que l'on rentre dans le cadre des statistiques, on peut toujours interpréter le signal brut de différentes façons. Suivant le profil que l'on choisit, le (ou les) filtres que l'on applique et les aspérités auxquelles on s'intéresse, il est ainsi possible d'obtenir toutes sortes de résultats : la moyenne des hauteurs des différentes saillies, par exemple, ou bien simplement la hauteur de la plus grande saillie, ou la plus grande amplitude entre la hauteur d'une saillie et la profondeur d'un creux, ou encore le nombre de saillies qui dépassent un certain seuil, etc. Mais aucun critère n'est plus pertinent qu'un autre.

Notre travail a porté sur l'évaluation des nombreux paramètres d'état de surface en utilisant le fichier de mesure avec l'appareil Rugosoft 10G de TESA. Nous avons pu calculer tous les paramètres que l'appareil indique (R_a , R_q , R_z , ...etc). Nous remarquons que certains paramètres calculés ne sont pas identiques à ceux indiqués par l'appareil tel que la largeur moyenne des éléments du profil (P_{sm} , R_{sm}). Ceci est peut être dû à l'ensemble des points dans chaque longueur de base ne présentant pas un élément du profil complet, ces points ne sont pas comptés par l'algorithme que nous avons appliqué.

Les différents paramètres ont été calculés suivant les normes ISO 4287 et ISO 4288. Signalons que nous avons également déterminé d'autres paramètres non prévus dans ces normes mais qu'on trouve dans Technique de l'Ingénieur, il s'agit des paramètres liés aux motifs AR, R, R_x .

L'étude d'état de surface est encore à développer pour déterminer les paramètres non calculés, tels que les paramètres définies par rapport à la courbe de taux de longueur portante situés dans la norme ISO 13565, et aussi les paramètres d'état de surface surfaciques définies dans la future norme ISO 25178.

Références bibliographiques

- [1] M.BOUAZIZ : Cours de métrologie, Département de Génie Mécanique ENP 2007
- [2] M.BASSIERE et E.GAIGNEBET : Métrologie générale, Théorie de la mesure, Les instruments et leurs emploi Editions : Dunod 1966, France
- [3] Bernard RAPHET : Technique de l'Ingénieur, États de surface Caractérisation, R1231, 2006, France.
- [4] Centre technique des industries mécaniques (CETIM) : Manuel des traitements de surfaces à l'usage des bureaux d'études 1987
- [5] Jacques BOULANGER : Technique De l'Ingénieur, Tolérances et écarts dimensionnels, géométriques et d'états de surface, B7010, France
- [6] Bernard RAPHET : Technique de l'Ingénieur, États de surface Caractérisation, R1230, 2005, France.
- [7] Jean-Hugues MARCHESE : Technique de l'Ingénieur, Spécification géométrique des produits (GPS), BM 5618, 2005, France.
- [8] ISO 4287 : Spécification géométrique des produits (GPS) — Etat de Surface : méthode du profil Termes, définitions et paramètres d'état de surface 1997
- [9] Marie-Line Zani : La mesure de rugosité, Quelques normes...et plusieurs dizaines de paramètres, octobre 2003
- [10] Patrick BOUCHARIEN : Technique de l'ingénieur, Métrologie des surfaces, R1390, 2005, France
- [11] D.Duhamel, A.Alaoui, C.Bernard : Cours de métrologie, Ecole nationale des ponts et chaussées, septembre 2005, France
- [12] F.Perez : Mode d'emploi TESA Rugosurf 10G, HEXAGON métrologie, Février 2007.
- [13] ISO 4288 : Spécification géométrique des produits (GPS) — Etat de Surface : méthode du profil, Règles et procédures pour l'évaluation de l'état de surface.

Annexe A

Liste des Normes concernant l'état de surface

Le tableau ci-dessous donne la liste des normes concernant la caractérisation d'états de surface.

Référence	Date de publication	Titre
NF EN ISO 3274	Mars 1998	Spécification Géométrique des Produits (GPS) Etat de surface : Méthode du Profil Caractéristiques nominales des appareils à contact (palpeur)
NF EN ISO 4287	1997/98	Spécification Géométrique des Produits (GPS) Etat de surface : Méthode du Profil Termes, définitions et paramètres d'états de surface
NF EN ISO 4288	Mars 1998	Spécification Géométrique des Produits (GPS) Etat de surface : Méthode du Profil Règles et procédures pour l'évaluation de l'état de surface
NF EN ISO 5436-1 ISO/DIS 5436-2	Août 2000	Etat de surface : Méthode du Profil : Etalons -1 : Mesures matérialisées -2 : Etalons logiciels
NF EN ISO 8785	Décembre 1999	Imperfections de surface – Termes, définitions et paramètres
NF EN ISO 11562	Mars 1998	Spécification Géométrique des Produits (GPS) Etat de surface : Méthode du Profil Caractéristiques métrologiques des filtres à phase correcte
NF EN ISO 12085	Mars 1998	Spécification Géométrique des Produits (GPS) Etat de surface : Méthode du Profil Paramètres liés aux motifs

NF EN ISO 1302	2002	Dessins Techniques Indication des états de surface
NF EN ISO 12179	Mai 2000	Spécification Géométrique des Produits (GPS) Etat de surface : Méthode du Profil Etalonnage des instruments à contact (palpeur)
NF EN ISO 13565-1	Mars 1998	Spécification Géométrique des Produits (GPS) Etat de surface : Méthode du Profil : Surfaces ayant des propriétés fonctionnelles différentes suivant les niveaux
NF EN ISO 13565-2	Mars 1998	Partie 1 : Filtrage et conditions générales de mesurage
NF EN ISO 13565-3	1998	Partie 2 : Caractérisation des hauteurs par la courbe du taux de longueur portante Partie 3 : Caractérisation des hauteurs utilisant la courbe de probabilité de matière pour des surfaces ayant deux composantes verticales aléatoires

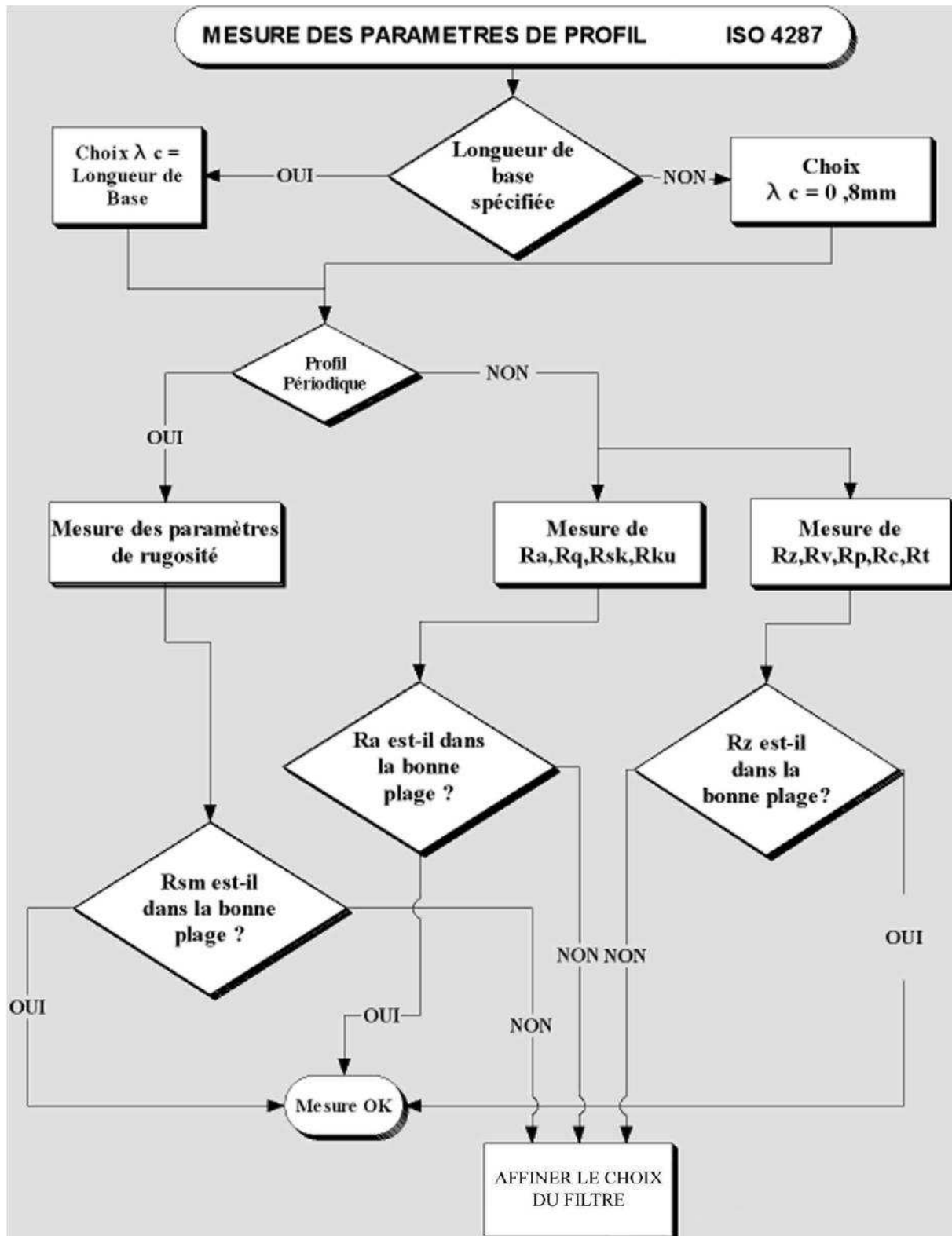
Annexe B

Données techniques de l'appareil de mesure Rugosurf 10G

Etendue de mesure	Ra 0 à 75 μ m, Rt 0.05 à 300 μ m
Résolution	0.001 μ m
Filtre électronique	Gauss conforme à ISO 11562
Longueur totale	(Nombre de Cut-off + 1) x λ c
Longueur d'évaluation	Nombre de Cut-off x λ c
Clavier	Clavier tactile à 4 touches, protégé contre la pénétration des liquides et les particules de poussière.
Affichage	Ecran LCD couleur, TFT 2'', 220x176 pixels
Consommation	6.5VA max 0220V
Système de palpage	Inductif
Touche diamant	R = 5 μ m, 90°
Force de mesure	0.75mN conforme à ISO 3274
Température de travail	+10 à +40°C
Température de stockage	-10 à + 50°C
Recharge complète	16 Heurs
Autonomie	999 mesures au maximum
Sortie des données	RS232
Encombrement	120x55x80mm (rugosimètre seul)
Poids	590g

Annexe C

Organigramme décisionnel :



Les plages de Ra, Rz et Rsm sont définies dans l'annexe D.

Annexe D

D'après la norme ISO 4288 voici les plages de quelques paramètres par rapport à la longueur de base et la longueur d'évaluation de la rugosité.

Longueurs de base pour le mesurage de Ra, Rq, Rsk, Rku, Rdq et pour les courbes et paramètres associés de profils non-périodiques.

Mesure de Ra μm	Longueur de base de la rugosité (mm)	Longueur d'évaluation de la rugosité (mm)
$0.006 < \text{Ra} < 0.02$	0.08	0.4
$0.02 < \text{Ra} < 0.1$	0.25	1.25
$0.1 < \text{Ra} < 2$	0.8	4
$2 < \text{Ra} < 10$	2.5	12.5
$10 < \text{Ra} < 80$	8	40

Longueurs de base pour le mesurage de Rz, Rv, Rp, Rc, Rt de profils non-périodiques.

Mesure de Ra μm	Longueur de base de la rugosité (mm)	Longueur d'évaluation de la rugosité (mm)
$0.025 < \text{Rz} < 0.1$	0.08	0.4
$0.1 < \text{Rz} < 0.5$	0.25	1.25
$0.5 < \text{Rz} < 10$	0.8	4
$10 < \text{Rz} < 50$	2.5	12.5
$50 < \text{Rz} < 200$	8	40

Longueurs de base pour le mesurage des paramètres R de profils périodiques et de Rsm de profils périodiques ou non-périodiques.

Mesure de Ra μm	Longueur de base de la rugosité (mm)	Longueur d'évaluation de la rugosité (mm)
$13 < \text{Rsm} < 40$	0.08	0.4
$40 < \text{Rsm} < 130$	0.25	1.25
$130 < \text{Rsm} < 400$	0.8	4
$400 < \text{Rsm} < 1300$	2.5	12.5
$1300 < \text{Rsm} < 4000$	8	40