

CONSERVATOIRE NATIONAL DES ARTS ET METIERS

CENTRE DE PARIS

Rapport de PROBATOIRE

Spécialité :

INSTRUMENTATION - MESURE

Présenté par :

Olivier CHOQUET

TECHNIQUES DE CONTROLE D'ASPECT DE SURFACES

Soutenu le 30 mai 2002

JURY

MEMBRES :	M.	P. JUNCAR	Professeur au CNAM
	M.	F. LEPOUTRE	Professeur au CNAM
	M.	M. PLIMMER	Professeur au CNAM
	M.	Y. SURREL	Professeur au CNAM

Table des matières

1. Introduction.....	3
2. Etats de surface	4
2.1. Ordres de grandeur	4
a) Définitions : écarts de forme, ondulations, rugosité	5
b) Illustrations	6
2.2. Notions de fréquences spatiales	7
a) Représentation à deux dimensions	7
b) Paramètres liés aux motifs et à la ligne enveloppe	8
c) Paramètres liés à la ligne moyenne	8
3. Les différentes méthodes de contrôle	9
4. Les systèmes à contacts	10
5. Les systèmes optiques.....	11
5.1. Principe de l'interférométrie	11
a) Technique classique	12
b) Le codage chromatique	13
5.2. La profilométrie laser.....	14
5.3. La projection de franges	15
5.4. De la projection de franges à la « Déflectométrie »	16
5.5. La vision industrielle	17
6. Leur sensibilité à l'environnement	18
7. Leurs résolutions	18
8. Conclusion.....	19
Table des illustrations	20
Bibliographie.....	21

Résumé

Le contrôle de l'état de surface d'un objet fait intervenir de nombreux paramètres (planéité, rugosité, etc...) à diverses échelles (millimétriques, nanométriques) qu'il est important de mesurer . Nous avons tout d'abord fait une liste descriptive des principales données à connaître pour caractériser l'état d'une surface. Nous avons ensuite décrit les différentes techniques de mesure, mécaniques et optiques, en particulier les systèmes interférométriques ou confocales, les techniques de projection de franges permettant de mesurer des écarts de formes très rapidement et sans contact. En conclusion, deux tableaux résument les sensibilités de ces diverses méthodes à l'environnement dans lequel elles vont être mises en œuvre ainsi que les gammes de résolution et les surfaces pouvant être analysées par chacune de ces méthodes.

Abstract

1. Introduction

Les propriétés d'une surface sont extraordinairement nombreuses et complexes. A l'œil ou au toucher, nous savons si une surface est lisse ou pas, si elle est brillante, mate, si elle présente des rayures ou des traces de chocs. Mais quantifier tous ces paramètres d'aspect devient un problème complexe car l'aspect d'une surface englobe ses caractéristiques géométriques (sa forme, sa planéité, sa circularité), son relief microscopique (sa rugosité, sa texture, ses défauts de surface) et son apparence par rapport à la lumière (sa couleur, sa brillance, sa transparence...).

On cherche à caractériser ces propriétés par des paramètres simples qui ne donneront bien évidemment jamais une représentation complète de l'état d'une surface.

Ne pouvant détailler un sujet aussi vaste, nous nous limiterons à l'analyse de diverses méthodes qui permettent de caractériser les surfaces par leurs propriétés géométriques macroscopiques (forme : rectitude, planéité ou circularité) et microscopiques (rugosité).

Nous présenterons plus particulièrement les propriétés de rugosité d'une surface en décrivant les deux principaux systèmes de mesure de rugosité (mécanique et optique). Nous décrirons particulièrement quelques instrumentations optiques permettant d'accéder aux propriétés microscopiques d'une surface et aux paramètres tels que les écarts de formes.

2. Etats de surface

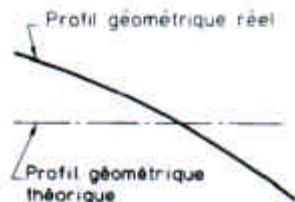
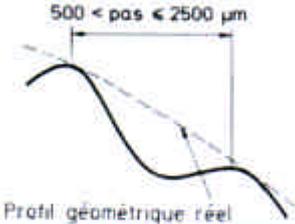
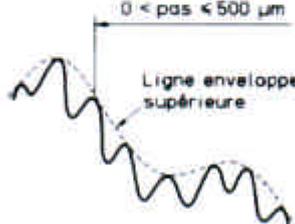
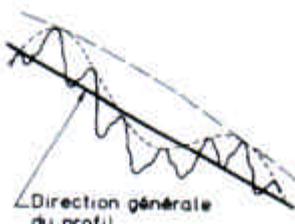
Cette partie présente les caractéristiques géométriques des surfaces et rappelle les principes physiques nécessaires à la compréhension du fonctionnement des appareils de mesures. [1]

2.1. Ordres de grandeur

On appelle **états de surface** les irrégularités des surfaces dues au procédé d'élaboration de la pièce (usinage, moulage, etc.).

Ces irrégularités sont classées par ordre de grandeur de leur fréquence spatiale dans le **Tableau 1** :

Tableau 1 - Différents ordres de grandeur des irrégularités géométriques [2].

Différents ordres de grandeur des irrégularités géométriques			
Numéro d'ordre	Type d'irrégularités	Croquis	Origines possibles
1	Écarts géométriques Défauts de planéité ; de rectitude ; de circularité ; de cylindricité, etc.		Qualité de la machine. Fixation imparfaite de la pièce ou de l'outil. Déformation en cours de travail de la pièce ou de l'outil.
2	Ondulation Irrégularités géométriques telles que la distance entre deux sommets d'irrégularités soit comprise entre 500 µm et 2 500 µm (1).		Vibrations de basse fréquence de la pièce, de l'outil ou des deux. Avance par tour de fraise quand celle-ci est comprise entre 0,5 et 2,5 mm.
3	Rugosité Irrégularités géométriques telles que la distance entre deux pics de ces irrégularités soit comprise entre 0 et 500 µm (1).		Trace géométrique de l'outil : avance par tour (tournage) ou avance par dent (fraisage) si celles-ci sont comprises entre 0 et 0,5 mm. Trace des grains de meulage, de grenailage, etc.
	Profil total (somme des écarts)		Ensemble des écarts de profil dont l'analyse permet de déterminer leur influence spécifique sur une ou plusieurs fonctions données.

(1) Limites données pour l'automobile.

a) Définitions : écarts de forme, ondulations, rugosité

Pour caractériser la géométrie d'une surface, on s'intéressera aux variations de la cote $z(x, y)$ localement normale à la surface moyenne en fonction des paramètres x et y de position sur la surface, et ce, à différentes échelles comme l'illustre la **Figure 1** [3] [10].

A l'**échelle de la globalité de la pièce**, on s'intéresse aux écarts de la surface moyenne par rapport à une surface idéale de forme simple : plan, sphère, cylindre ou cône par exemple. Dans cette étude des écarts de forme, on fera abstraction de la rugosité en définissant une surface moyenne locale.

À une **échelle microscopique** (quelques micromètres ou quelques dizaines de micromètres en x et y), il s'agira de ce que l'on appelle la **rugosité**, que l'on n'étudiera généralement pas sur toute la surface, mais sur quelques échantillons judicieusement distribués. Cela pourra être un élément de surface dont on donnera une image à deux dimensions ou une ligne analysée suivant une dimension.

On voit là une difficulté fondamentale dans l'étude des périodes des défauts pris en compte. Les écarts à une surface simple idéale sont variables suivant que l'on prend ou non en compte des défauts de période spatiale particulière. On appellera **écarts de forme** les écarts de la surface réelle localement lissée, par rapport à la surface idéale. On appellera **rugosité** les écarts par rapport à une surface lisse mais qui suit les écarts de forme de la surface réelle. Et entre les défauts de rugosité, c'est-à-dire de grandes fréquences spatiales, et les écarts de forme, c'est-à-dire de petites fréquences spatiales, on distingue ce que l'on appelle l'**ondulation** (en anglais « waviness ») qui rassemble les défauts dont les périodes spatiales sont comprises entre quelques centaines de micromètres et quelques millimètres.

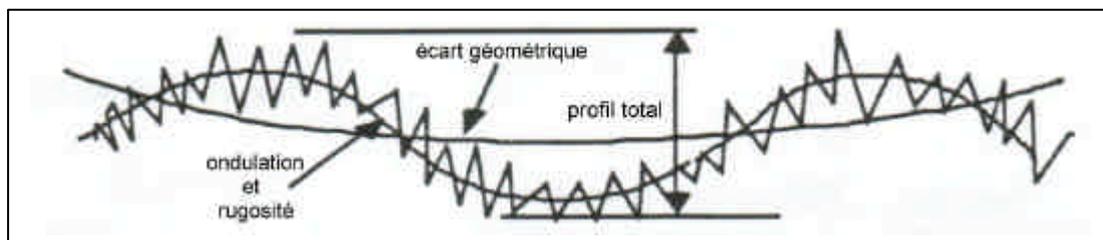


Figure 1 - Les éléments du profil.

b) Illustrations

Les périodes et les fréquences spatiales sont choisies conventionnellement.

Les valeurs limites des fréquences spatiales sont susceptibles de changer en fonction des applications, mais le principe de ces filtrages est fondamental pour comprendre et caractériser un profil de surface.

Sur la **Figure 2a** on trouve le **profil de surface** enregistré par palpeur mécanique suivant une ligne droite. On y décèle bien des défauts de natures diverses, mais il n'est pas possible d'y définir quantitativement et séparément rugosité, ondulation et écarts de forme. On sent bien intuitivement que la rugosité se manifeste localement à courte échelle, qu'une tendance à des courbures se dessine sur l'ensemble de la pièce, et que des courbures locales apparaissent indépendamment.

Les **écarts de forme** par rapport à une droite sont donnés par l'enregistrement de la **Figure 2b**. On y a supprimé toutes les fréquences spatiales supérieures à $0,5 \text{ mm}^{-1}$, c'est-à-dire toutes les périodes spatiales inférieures à 2 mm.

L'enregistrement de la **Figure 2d** est au contraire celui d'où on a éliminé toutes les variations dont la fréquence spatiale est inférieure à 3 mm^{-1} , c'est-à-dire toutes les périodes spatiales plus grandes que $333 \text{ }\mu\text{m}$. Il met en évidence la **rugosité** de la surface.

L'**ondulation** est la courbe donnée par la **Figure 2c** du profil de surface d'où sont éliminés par un filtre passe-bande entre $0,5$ et 2 mm^{-1} les écarts de forme et la rugosité.

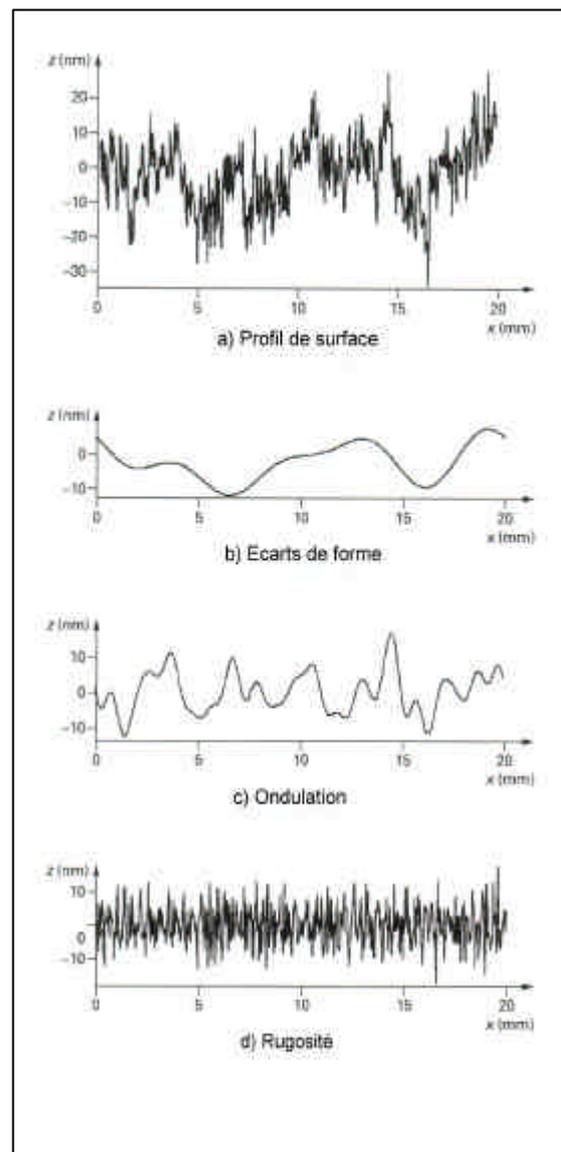


Figure 2 - Profil complet, écarts de forme, ondulation, rugosité. [1]

2.2. Notions de fréquences spatiales

Toute la difficulté dans l'évaluation des paramètres géométriques d'une surface est de définir les domaines de fréquences spatiales attribués aux trois catégories de défauts que nous avons distingués précédemment §1.1.

a) Représentation à deux dimensions

La notion de fréquences spatiales est très utile pour comprendre la structure géométrique d'une surface. Cette notion est compliquée par le fait que nous sommes à deux dimensions, et deux fréquences de même période peuvent différer par leur direction (**Figure 3**). La représentation d'une fonction à deux dimensions par son spectre est moins intuitive que celle d'un signal temporel, mais le formalisme mathématique de la transformation de Fourier est tout à fait comparable.

Les notions de **fonction d'auto corrélation** et de **densité spectrale de puissance**, bien connues pour les signaux temporels à une dimension, sont directement transposables à la caractérisation géométrique d'une surface à deux dimensions.

Une description complète de la morphologie d'une surface passe donc par la densité spectrale de puissance de ses écarts à la surface idéale, qui est donnée par la transformée de Fourier de sa fonction d'auto corrélation.

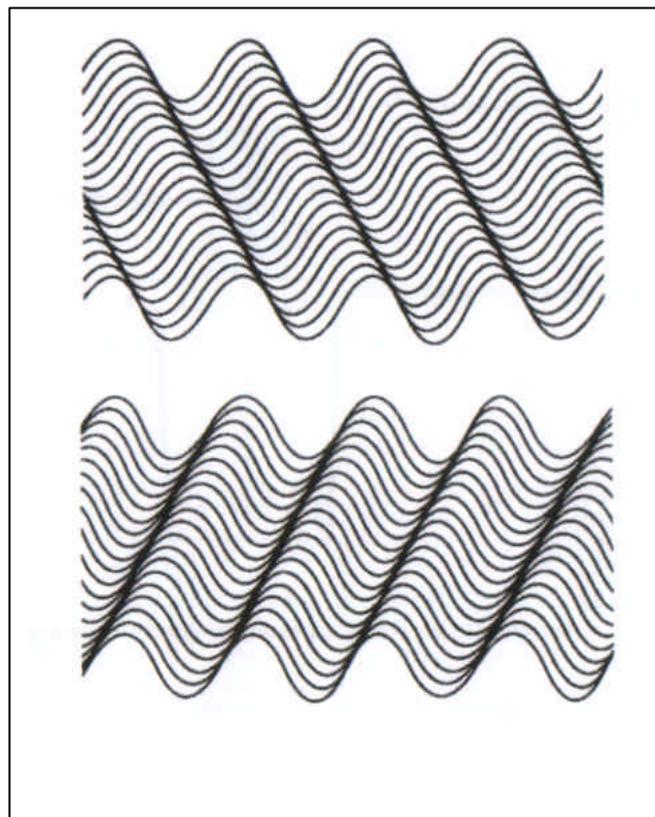


Figure 3 - Deux fréquences spatiales bidimensionnelles, de même période et de directions différentes. [1]

Les exemples donnés sur la **Figure 2** sont obtenus par **filtrage numérique**, c'est-à-dire que les fonctions de transfert sont connues exactement (*voir les valeurs*).

Les signaux enregistrés dans la pratique sont traités par des **filtres**, dont les fonctions de transfert sont différentes d'un système à l'autre (analogique, mécanique, numérique), voire n'existent pas si le processus de lecture n'est pas linéaire. C'est la raison essentielle des désaccords dans les comparaisons sur les états de surface et les écarts de forme, bien plus que l'étalonnage des capteurs utilisés pour mesurer les très petits écarts $z(x, y)$.

b) Paramètres liés aux motifs et à la ligne enveloppe

On appelle **motif de profil** une portion de profil comprise entre deux pics (**Figure 4**) [13]. 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. 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 (ces paramètres sont regroupés dans le **Tableau 2**).

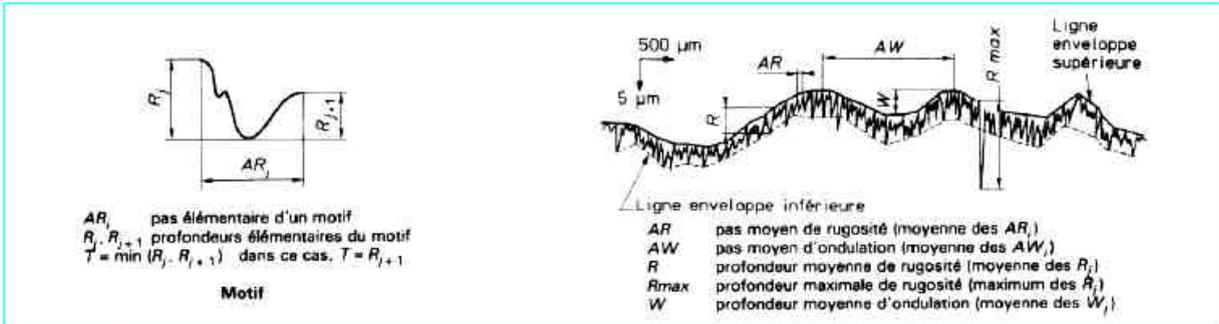


Figure 4 - Evaluation des pas et des profondeurs des irrégularités caractéristiques. [2]

c) Paramètres liés à la ligne moyenne

Qu'il s'agisse de rugosité ou d'ondulation, les valeurs des paramètres qui seront donnés sont des moyennes. Dans la norme ISO 4287/1, la référence pour le calcul des paramètres est la **ligne des moindres carrés** calculée sur une longueur de base ; en pratique, il est conseillé que la longueur de base soit au minimum égale à cinq fois le pas de rugosité. La valeur moyenne des paramètres est calculée en effectuant la moyenne des valeurs trouvées sur cinq longueurs de base (**Figure 5**).

Le choix d'une longueur de base trop faible atténue les amplitudes mesurées.

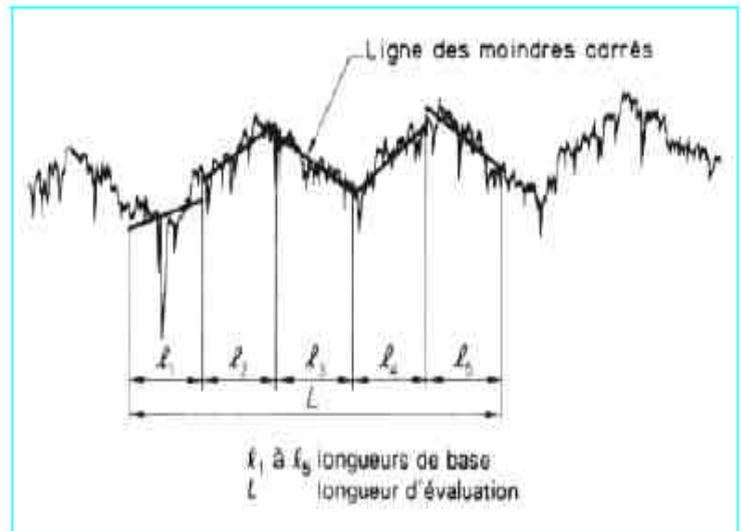


Figure 5 - Ligne de référence ISO des moindres carrés sur la longueur de base [2]

Tableau 2 - Définition des paramètres d'état de surface. [2]

Caractéristiques		Rugosité	Ondulation	Profil total
liées aux motifs	Profondeur moyenne des motifs.....	R	W	P_r
	Profondeur maximale des motifs.....	R_{max}	W_{max}	
	Profondeur totale du profil.....		W_t	
	Pas moyen des motifs.....	AR	AW	
liées à la ligne moyenne	Hauteur de saillie maximale.....	R_y	W_t	
	Moyenne des R_y sur cinq longueurs de base.....	R_z (2)		
	Hauteur de pic maximale.....	R_p	W_p	
	Profondeur de vallée maximale.....	R_v (1)	W_v (1)	
	Ecart moyen arithmétique.....	R_a	W_a	
	Ecart moyen quadratique.....	R_q	W_q (1)	
Pas moyen au niveau de la ligne moyenne.....	S_m	S_{wm} (1)		
liées à la distribution des amplitudes	Taux de longueur portante.....			T_p (c)

(1) Projet de révision ISO 4287/1.
(2) Norme DIN 4768.

3. Les différentes méthodes de contrôle

Parmi les paramètres caractéristique des états de surface la rugosité est un des plus important car il intervient dans la brillance, dans la diffusion de la lumière et dans les caractéristiques mécaniques

Pour ce qui est de la rugosité, de la texture et des défauts de surface ponctuels, les méthodes les plus couramment utilisées sont les systèmes de mesures à contacts et optiques qui fournissent des résultats quantitatifs avec une résolution comparable.

Le Tableau 3 rassemble les différents procédés utilisés pour déterminer les paramètres des états de surface. Nous allons ensuite les décrire.

Tableau 3 - Les procédés de contrôle d'états de surface [5].

Types de procédés	Méthodes de contrôle	Principes physiques	Types de défauts détectés	Domaines d'application
Mécanique	palpeur		Mesure de profondeur de défauts	Profils de surface sur pièces de formes simples
Optique	Vision industrielle (caméras) Examen visuel direct ou assisté	Formation d'images	Détection et localisation de défauts d'aspect	Contrôles rapides en ligne. Pièces fragiles ou déformables surfaces difficiles d'accès.
	Triangulation laser	Triangulation optique	Mesure de profondeur de défauts	Convient aux tailles importantes
	Microscopie confocale	Différence de chemin optique		Cartographie 3D de surface, profilométrie, analyse de la texture (échantillons de petites tailles)
	Microscopie interférométrique			
	Projection de franges	Projection d'une lumière blanche structurée	Défauts de formes	Inspection rapide de surfaces de tailles importantes

4. Les systèmes à contacts

Les systèmes à contact permettent de mesurer les états de surface suivant des procédures normalisées. Qu'il s'agisse de rugosimètres ou de profilomètres à stylet, ils sont munis d'une unité d'avance, au bout de laquelle se situe un palpeur qui balaye la surface de la pièce suivant plusieurs segments prédéfinis.

Deux instruments de mesure sont nécessaires :

- un capteur de déplacement suivant x (ou y) dont l'étalonnage ne pose pas de problème particulier, parce que la mesure de l'amplitude du déplacement n'est pas critique ;
- Un capteur de faible amplitude et de grande sensibilité mesurant les déplacements suivant z du palpeur au cours de la translation.

La mesure peut être faite en prenant pour référence le système de translation de la machine (**Figure 6a**). Le parallélisme entre la surface étudiée et la translation du palpeur doit alors être très soigneusement ajusté.

Pour une meilleure sensibilité et pour ne pas être gêné par les défauts de forme de la pièce, on peut faire la mesure avec un palpeur différentiel qui donne la différence d'altitude entre le point palpé et une surface moyenne située à proximité (**Figure 6b**).

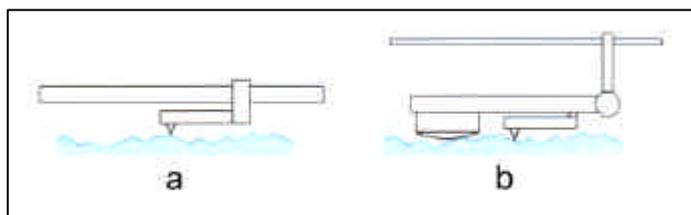


Figure 6 - Palpeurs pour l'étude de la rugosité.

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

Dans les méthodes à contact mécanique, la forme du palpeur effectue un filtrage passe-bas qui élimine les défauts dont la période est petite devant le rayon de courbure du palpeur. Ce filtrage est extrêmement complexe et peut difficilement être modélisé. Ce filtrage mécanique est souvent complété par un filtrage électrique ou par un filtrage numérique effectué par le système d'acquisition et de traitement des données. On peut donner de ces derniers une représentation plus simple et plus conforme à la réalité (filtres électriques, qui filtrent dans le domaine temporel, et qui exigent la maîtrise de la vitesse du palpeur, filtres numériques qui sont de plus en plus souvent associés au traitement des données par ordinateur).

5. Les systèmes optiques

Les systèmes optiques reposent sur l'envoi d'un faisceau lumineux sur la surface de l'échantillon à analyser et sur l'enregistrement du faisceau réfléchi. L'optique offre comme toutes les méthodes sans contact, l'intérêt de pouvoir contrôler des pièces fragiles ou déformables. Le contrôle s'effectue aussi à une vitesse élevée. En revanche aucune méthode n'est encore normalisée.

5.1. Principe de l'interférométrie

L'interférométrie est une méthode couramment utilisée (**Figure 7**). La différence de chemin optique entre le faisceau réfléchi par la surface de l'échantillon et le faisceau réfléchi par un miroir de référence génère des figures d'interférences.

En effet, l'amplitude du rayonnement réfléchi par l'échantillon peut s'écrire : $S_1 = a_1 \cos(2\delta f t)$

Celle réfléchi par le miroir mobile peut s'écrire :

$$S_2 = a_2 \cos(2\delta f t + \delta)$$

où δ est le déphasage introduit par la différence des trajets des deux rayonnements, et $2\delta f$ est la fréquence du rayonnement utilisé.

Pour un déplacement L du miroir mobile, on obtient la relation :

$$j = 2p \frac{d}{\lambda_{\text{air}}}$$

où $d = 2L$ différence de chemin optique et λ_{air} est la longueur d'onde du rayonnement utilisé dans l'air.

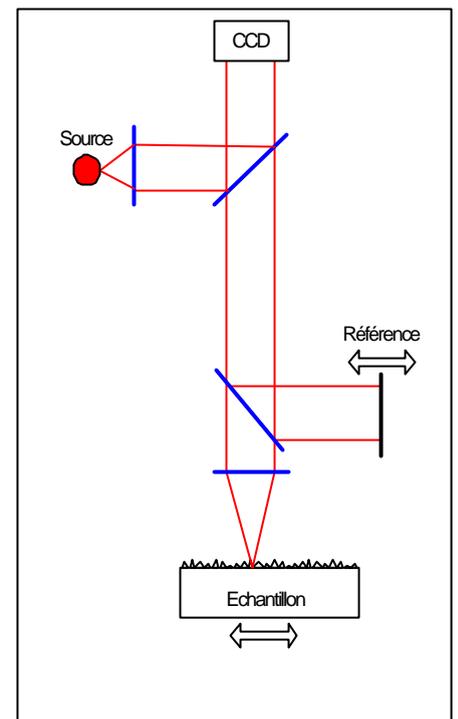


Figure 7 - Principe de l'interférométrie

En déplaçant le miroir par exemple et en mesurant l'intensité du faisceau réfléchi après ce déplacement on accède à la hauteur relative de chaque point de la surface [6].

Si l'on déplace lentement le miroir référence (**Figure 7**), l'intensité du rayonnement mesuré grâce à une caméra augmente et diminue, elle s'annule avec un pas de déplacement correspondant à une demi-longueur d'onde, soit une variation totale de la trajectoire d'une longueur d'onde. Si la longueur d'onde est connue, le déplacement peut être ainsi mesuré avec précision. De cette observation vient l'analogie entre un interféromètre et une règle à traits gravée tous les $\lambda/2$, appelé **interfrange**. En comptant ces alternances d'intensité lumineuse, appelées **franges**, il est donc possible de mesurer la longueur L du déplacement du miroir mobile : $L = K \lambda/2$ (K réel) et déterminer ainsi le profil de la surface de la pièce.

Le domaine de rugosité accessible par cette technique est de l'ordre de **0,1 à 15 nm en 2D** et **0,3 à 15 nm en 3D** [7]. Une limitation est due à la rugosité de la pièce de référence ; il existe donc des appareils utilisant la surface à mesurée comme référence (avec deux faisceaux).

Principe de la microscopie confocale

a) Technique classique

Le rayonnement provenant d'un point situé au-dessus ou au-dessous de M est filtré par le diaphragme. Il est ainsi possible de réaliser une « coupe optique » à une profondeur quelconque d'un objet sans être gêné par les autres parties de l'objet. Cette propriété de « coupe optique », ainsi qu'une résolution latérale meilleure que celle offerte en microscopie conventionnelle (tache de diffraction plus petite), sont les deux avantages majeurs de la microscopie confocale.

En déplaçant l'échantillon suivant l'axe vertical (**Figure 8**) on obtiendra un maximum d'intensité lorsque celui ci sera au point focal ; on obtiendra ainsi une série de coupes optiques de la surface de l'échantillon.

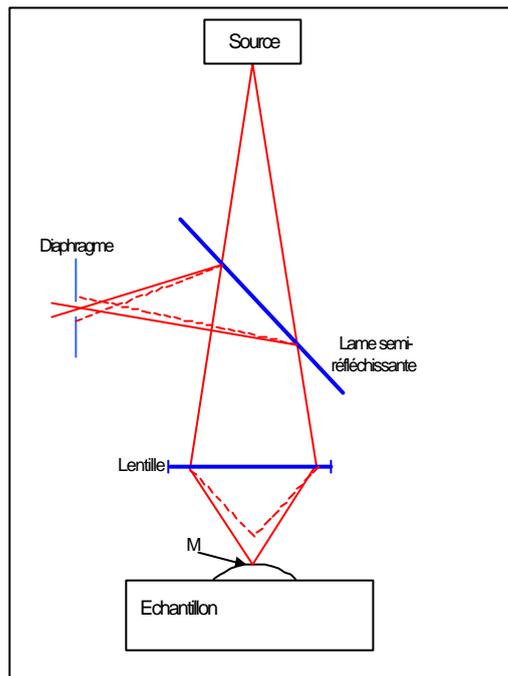


Figure 8 - Principe de la microscopie confocale

La résolution verticale est comprise entre **5 et 20 nm** avec une étendue de mesure ne dépassant pas le millimètre.

b) Le codage chromatique

Les techniques classiques en microscopie confocale effectuent un déplacement de l'échantillon ou du détecteur ce qui est évidemment un inconvénient (en termes de fiabilité, vitesse de mesure notamment).

Le codage chromatique est réalisé en mettant à profit le chromatisme axial des objectifs qui permet de transformer une source ponctuelle poly chromatique en un continuum d'images monochromatiques uniformément réparties sur un segment de droite de longueur égale à la profondeur de champ requise et par la même d'attribuer à chaque point du champ de mesure une longueur d'onde et une seule (**Figure 9**).

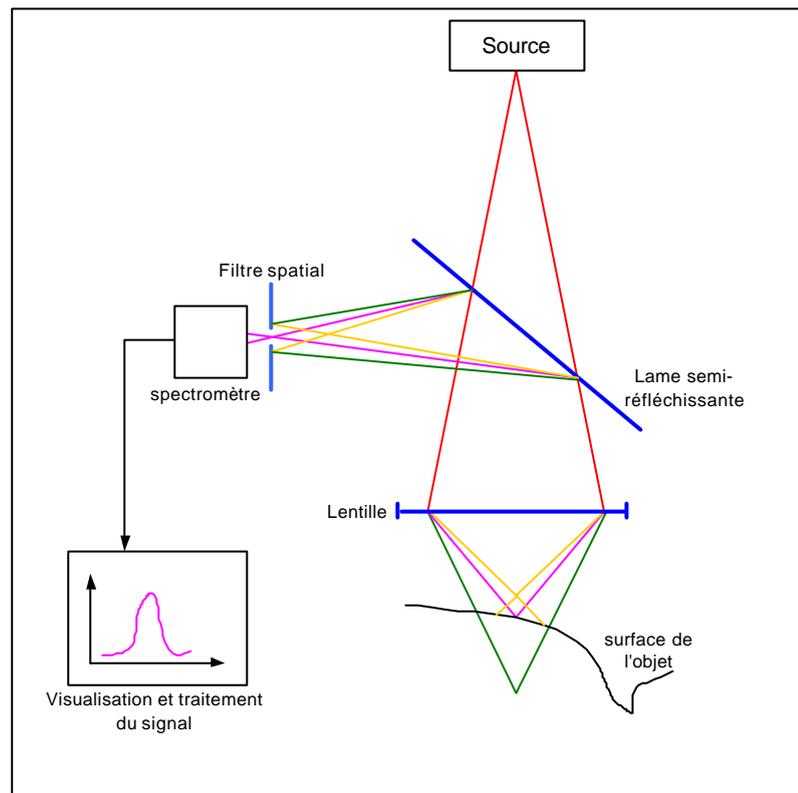


Figure 9 - Le codage chromatique

Avec le codage chromatique, ces inconvénients sont supprimés : on obtient une précision élevée sur une grande profondeur de champ, tout en n'ayant aucune pièce en mouvement. Le codage chromatique de l'espace de mesure est beaucoup plus précis et nettement plus « robuste » (insensibilité à la lumière parasite) que le codage habituellement utilisé.

5.2. La profilométrie laser

La profilométrie laser est une méthode séquentielle. Le déplacement de l'échantillon ou de la source permet d'obtenir un profil, ou une série de profils si l'on souhaite une cartographie 3D. La méthode peut être coaxiale ou basée sur le principe de triangulation, selon que le faisceau émis et le faisceau réfléchi suivent le même trajet optique ou pas.

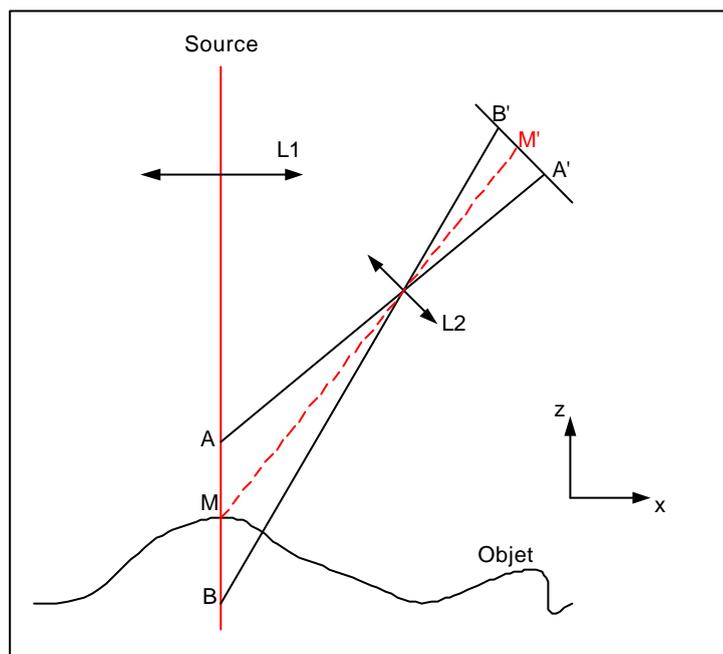


Figure 10 - Principe de la profilométrie dans le cas d'un capteur à triangulation

La source constitue un pinceau d'éclairage unidirectionnel, et code de façon univoque un segment AB de l'espace de mesure (**Figure 10**). Un détecteur linéaire A'B' forme l'image M' du point M correspondant à l'intersection du segment AB avec l'objet. Le profil photométrique du point M' est quasi gaussien. Le calcul de son barycentre permet de déterminer la position z du point M dans le segment AB.

La résolution de la mesure dépend de la qualité du profil photométrique du point M' sur le détecteur linéaire. Elle sera très affectée par la présence de la lumière parasite environnante atteignant l'objet. Cette lumière parasite peut avoir deux effets ; l'un sera de modifier le profil de la gaussienne et par conséquent fausser le calcul du barycentre et donc de l'altitude z ; l'autre sera de réduire le contraste de la gaussienne et par conséquent d'amplifier indirectement les défauts locaux observés sur son profil et par la même de fausser le calcul du barycentre [4].

Les techniques actuelles basées sur ce principe permettent d'atteindre des **résolutions de l'ordre du mm** avec une étendue de mesure de quelques millimètres.

5.3. La projection de franges

La méthode n'a que très peu de points communs avec les autres techniques optiques. Elle permet d'inspecter des champs très larges et c'est aussi l'une des méthodes les plus robustes par rapport à l'environnement.

Le principe est basé sur la projection d'une lumière blanche structurée sous forme de franges à la surface de l'échantillon. Un décalage successif des franges et l'analyse de leur déformation à l'aide d'une caméra CCD permettent de déterminer le relief de la surface.

Sur l'échantillon, l'information de hauteur Z par rapport à une surface de référence est transformée en une information de déplacement U_x de la frange, et on a dans le cas le plus simple de la projection collimatée (**Figure 11**) :

$$Z = \frac{U_x}{\tan(A)}$$

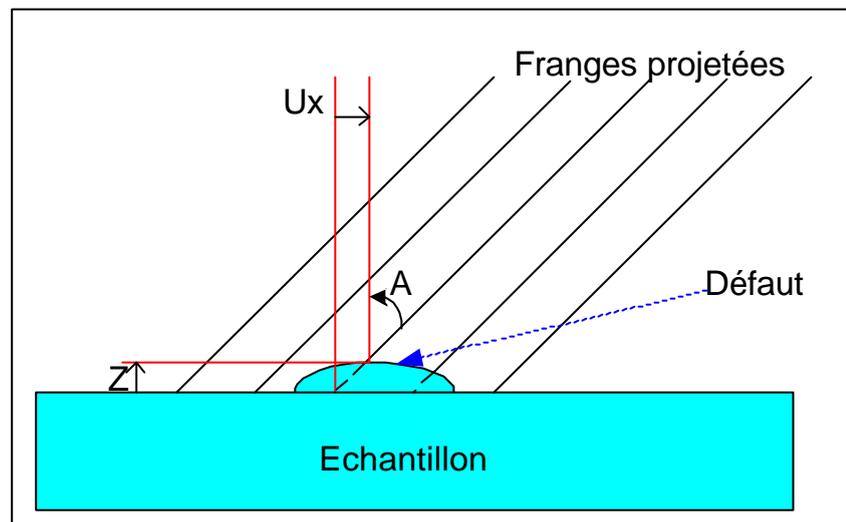


Figure 11 - Principe de la projection de franges.

Cette méthode permet donc une étendue de mesure plus grandes que les méthodes précédents, c'est à dire plus de 100 millimètres et avec une résolution comprise entre **2 et 10 mm**.

5.4. De la projection de franges à la « Déflectométrie »

A la différence de la projection de franges classiques où le motif est projeté directement sur la surface, ici la projection est effectuée sur un écran et la technique consiste à analyser la réflexion de ce motif par l'échantillon [9].

Sur la **Figure 12**, les traits de la grille sont supposés être orientés parallèlement à l'axe des x , de manière à ce que les pentes suivant y soient mesurées. Ce qui est observé sur l'écran ressemble à des franges d'interférence, à la différence que ces franges sont incomparablement plus stables vis-à-vis des vibrations parasites. En effet, ces vibrations n'induisent que des translations de corps solide au niveau de l'objet, qui ne modifient pas les pentes.

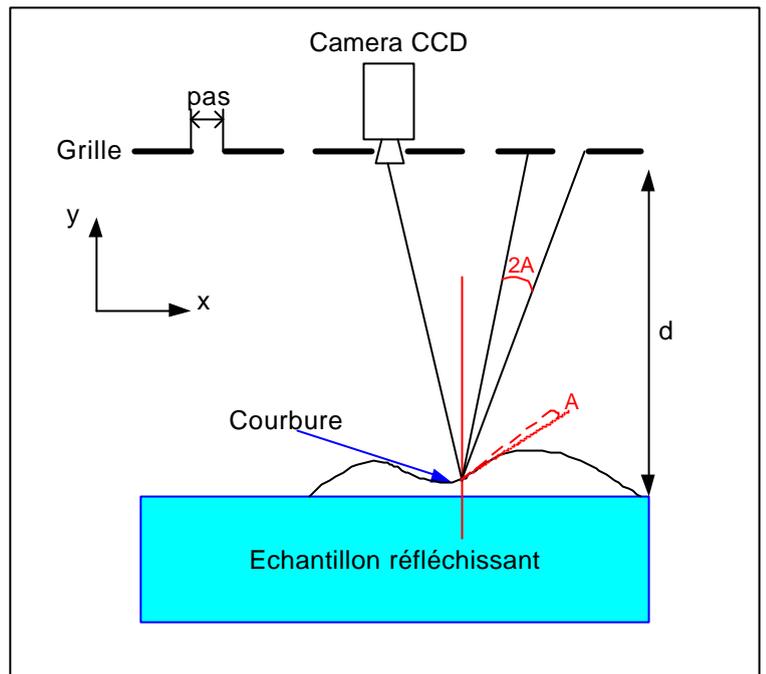


Figure 12 - principe de la déflectométrie [9]

Par rapport à la technique de l'interférométrie, l'intérêt de la déflectométrie est :

- l'insensibilité aux vibrations
- la possibilité de régler la sensibilité. En effet, celle-ci dépend du pas p de la grille d'analyse. On peut donc augmenter cette valeur si la surface présente des variations de hauteurs et donc des pentes importantes, pour diminuer le nombre de franges observées. Ceci n'est pas possible en interférométrie où la distance entre deux franges dépend de la longueur d'onde et n'est donc pas modifiable dans de grandes proportions.

Avec les caméras et les traitements informatiques il est possible d'atteindre une résolution d'un **1/100 de pas** sur une étendue de mesure de l'ordre du **mètre carré**.



Figure 13 - exemple de déflectomètre

5.5. La vision industrielle

Les systèmes optiques et mécaniques doivent composer avec une troisième méthode de contrôle : la vision industrielle.

Mais cette fois ci, l'objectif n'est pas de réaliser une analyse topographique ni de mesurer les paramètres d'états de surface. La méthode est plutôt utilisée pour détecter et localiser très rapidement toutes sortes de défauts d'aspects (taches, trous, rayures, etc.).

La vision industrielle est une technologie utile et souvent nécessaire dont les performances répondent aux exigences et aux contraintes industrielles. Son développement a bénéficié des progrès rapides et continus des détecteurs solides ponctuels, linéaires ou matriciels, ainsi que de la micro-informatique et de l'électronique de traitement d'images. La vision industrielle peut être définie comme suit : un ensemble autonome implanté dans un environnement industriel et regroupant une caméra ou tout autre capteur optoélectronique sensible aux longueurs d'onde lumineuses ainsi qu'une unité de traitement d'images, ces deux systèmes permettant de prendre éventuellement une décision automatique. Un secteur particulièrement concerné par la vision industrielle est la métrologie 2D ou 3D sans contact. De nombreux systèmes de mesure de positions, de formes et de distances sans contact sont utilisés dans l'industrie automobile, l'aéronautique, et surtout en milieu hostile (sous-marin, centrale nucléaire, chaudronnerie, etc.).

Exemple : **(Figure 14)**

Lorsque l'on veut réaliser un contrôle dimensionnel sans contact on peut utiliser une méthode de triangulation qui consiste à projeter un plan de lumière sur la surface à mesurer.

L'observation à partir d'une caméra CCD permet de saisir la ligne contour résultant de l'intersection de ce plan et de l'objet.

L'avantage de ce type d'acquisition n'est pas uniquement la rapidité de mesure mais aussi le fait que tous les points de la ligne sont mesurés dans la même configuration optomécanique. En conséquence, les coordonnées relatives mesurées sont absolument indépendantes des défauts résiduels de déplacement des éléments comme c'est le cas du balayage point par point.

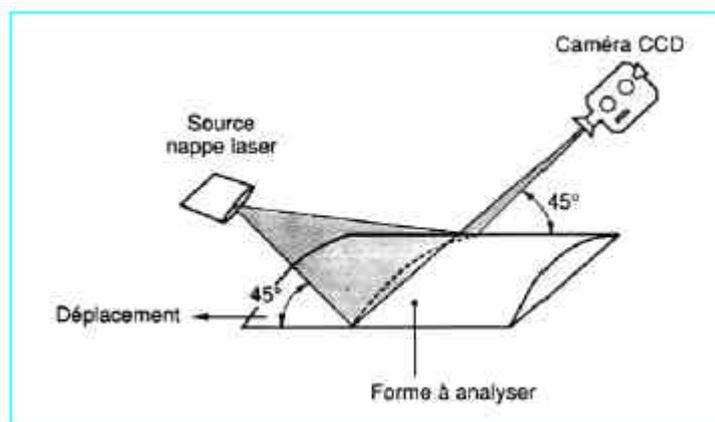


Figure 14 - Exemple d'utilisation de la Vison industrielle.

6. Leur sensibilité à l'environnement

L'environnement dans lequel se fait la mesure est un critère à prendre en compte. Les instruments à contact mécanique sont plus robustes. La force du stylet est généralement suffisante pour repousser les éventuelles poussières, ainsi que les films d'huile sur les surfaces usinées. En fait seules les vibrations peuvent être problématiques. Pour les atténuer, les systèmes à contact sont le plus souvent montés sur des socles en granit et dotés d'amortisseurs pneumatiques. Le **Tableau 4** rassemble les différentes méthodes et montre leur sensibilité.

Bien sûr chaque méthode s'utilise pour des résolutions différentes, il est donc difficile de conclure de par ce tableau qu'une méthode est meilleure qu'une autre mais il nous informe des facteurs d'influences à considérer.

Tableau 4 - Sensibilité des méthodes à l'environnement.

	Optique			Mécanique	
	Triangulation Laser	Microscopie Interférométrique	Microscopie Confocale	Projection de frange	Palpeurs
Vibrations					
Lumière ambiante					Aucune influence
Poussières					

(*peu sensible, sensible, très sensible*)

7. Leurs résolutions

Pour les faibles rugosités, le palpeur mécanique devient vite insuffisant et des techniques de mesures optiques prennent le relais. En revanche l'**inconvenient** est que la mesure n'a de sens que si cette rugosité est faible devant la longueur d'onde utilisée. En effet si la surface est très rugueuse, la lumière sera uniformément diffusée dans toutes les directions et ne représentera plus la topographie de la surface. De plus, la présence de poussière peut dénaturer les résultats. Ces mesures doivent donc être réservées à des états de surface de très bonne qualité et dans des conditions d'environnement exceptionnelles (flux laminaire, salle blanche).

Cependant, quelques recoupements ont pu être faits entre ces mesures et des mesures par palpeur mécanique qui donnent un accord satisfaisant entre ces deux techniques extrêmement différentes (**Figure 15**).

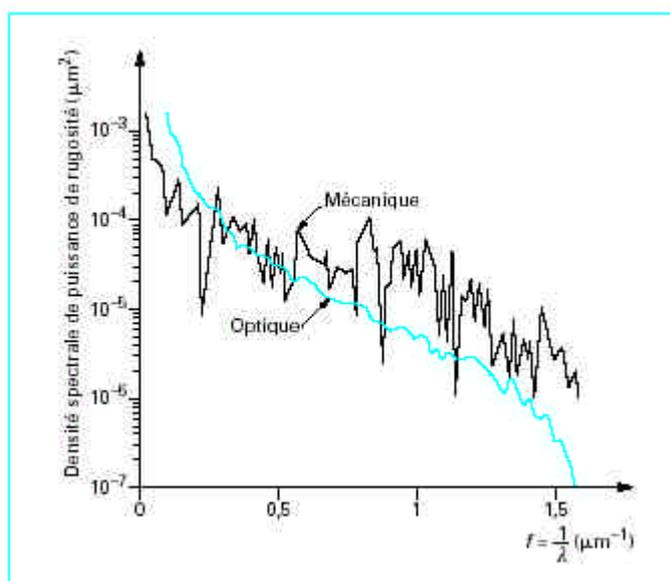


Figure 15 - Comparaison entre des densités spectrales de puissance obtenues par palpeur mécanique et par diffusion optique

Le **Tableau 5** résume les gammes de résolutions spatiales, et l'étendue de mesure des différentes méthodes d'analyse d'états de surface.

Tableau 5 - Résolutions

	Optique					Mécanique
	Microscopie interférométrique	Microscopie confocale	Projection de franges	Laser coaxial	Triangulation laser	Palpeur
Résolution verticale	0.1 – 5 nm	5 – 20 nm	2 – 10 μ m	15 nm	0.5 μ m	3 nm
Etendue de mesure	<0.1 mm	0.1 – 1 mm	20 – 120 mm	1.5 mm	3 – 12 mm	10 mm

8. Conclusion

Le rôle des surfaces dans les technologies modernes justifie le nombre très important d'instruments nouveaux apparus pour les étudier. Caractériser les surfaces d'un point de vue purement géométrique est chose complexe. Les outils de traitement des signaux à une dimension (filtres, analyseurs de spectres) ont trouvé leurs équivalents pour les grandeurs bidimensionnelles, et pour les surfaces isotropes, l'analyse unidimensionnelle d'un profil est suffisante pour apporter une bonne connaissance de la surface. À l'étalonnage des sondes et des capteurs qui servent à dresser la carte d'une surface, il faut adjoindre la connaissance des bandes passantes des fonctions de transfert de l'instrumentation mise en oeuvre. Cette dernière condition est souvent la plus difficile à remplir pour comparer des résultats obtenus par des voies différentes.

Nous avons vu des dispositifs très variés, dont certains mesurent une cote verticale, certains une différence de cotes entre points voisins ou éloignés, d'autres mesurent une pente locale, et d'autres enfin mesurent une variation de pente entre deux points voisins, c'est-à-dire une courbure locale. Ces différents procédés sont évidemment caractérisés par leur sensibilité, mais aussi et surtout par leur fonction de transfert des fréquences spatiales qui traitent différemment écarts de forme, ondulation et rugosité.

C'est l'exploitation complète mais prudente de ces instruments qui conduira, dans chaque discipline, à établir les procédures pour atteindre tel ou tel paramètre caractéristique d'une surface. Les recoupements de résultats d'origines diverses sont souvent le meilleur moyen de se prémunir contre les phénomènes aléatoires d'une technologie particulière. Les méthodes optiques et les palpeurs mécaniques, les méthodes microscopiques sont des techniques très différentes. Aucune n'est absolument meilleure que les autres ; elles sont toujours plus ou moins complémentaires.

Table des illustrations

Figure 1 - Les éléments du profil.	5
Figure 2 - Profil complet, écarts de forme, ondulation, rugosité. [1]	6
Figure 3 - Deux fréquences spatiales bidimensionnelles, de même période et de directions différentes. [1]	7
Figure 4 - Evaluation des pas et des profondeurs des irrégularités caractéristiques. [2]	8
Figure 5 - Ligne de référence ISO des moindres carrés sur la longueur de base [2]	8
Figure 6 - Palpeurs pour l'étude de la rugosité.....	10
Figure 7 - Principe de l'interférométrie	11
Figure 8 - Principe de la microscopie confocale.....	12
Figure 9 - Le codage chromatique	13
Figure 10 - Principe de la profilométrie dans le cas d'un capteur à triangulation.....	14
Figure 11 - Principe de la projection de franges.	15
Figure 12 - principe de la déflectométrie [9]	16
Figure 13 - exemple de déflectomètre.....	16
Figure 14 - Exemple d'utilisation de la Vison industrielle.....	17
Figure 15 - Comparaison entre des densités spectrales de puissance obtenues par palpeur mécanique et par diffusion optique	18
Tableau 1 - Différents ordres de grandeur des irrégularités géométriques [2].	4
Tableau 2 - Définition des paramètres d'état de surface. [2].....	8
Tableau 3 - Les procédés de contrôle d'états de surface [5].	9
Tableau 4 - Sensibilité des méthodes à l'environnement.	18
Tableau 5 - Résolutions	19

Bibliographie

- [1] BOUCHARÉINE (P) – La métrologie des surfaces. R1 390. Traité Mesures et contrôle, vol. R1 (1999)
- [2] BOULANGER (J) – Tolérance et écarts dimensionnels B 7 010. Traité Génie mécanique, vol. B7 (1999)
- [3] GAZAL (L.P.) – Erreurs de forme et de position. R1 220. Traité Mesures et contrôle, vol. R1 (1999)
- [4] JENKINS (F.A.) et WHITE (H.E.). – Fundamentals of optics. (4e éd.), McGraw Hill International editions, physics series. 1981, 746 p.
- [5] DUMONT-FILLON (J) – Contrôle non destructif (CND) R 1 400. Traité Mesures et Contrôle, vol. R1 (1999).
- [6] ROBLIN (G.). – La Microscopie optique. R 6 712. Traité Mesures et Contrôle, vol. R6 (1999).
- [7] MARIOGE (J.P.). – Contrôle des systèmes optiques. E 4 050. Traité Electronique, vol. E4 (1999).
- [8] MARIOGE (J.P.). – Etats de surface, défauts locaux et rugosité :
1. Les défauts locaux : J. Optics, vol. 24, n°4 P. 177-192 (1993)
 2. La rugosité : J. Optics, vol. 24, N°5, P.217-239 (1993)
- [9] Mesures. N°735 – P.50 (Mai 2001)

Normalisation

Normes françaises (AFNOR) et internationales (ISO) sur la rugosité, les états de surface et les écarts de forme :

- [10] ISO 4287 (NF E 05-015) 1997 État de surface : méthode du profil – Termes, définitions et paramètres d'état de surface.
- [11] ISO 4288 (NF E 05-054) 1996 État de surface : méthode du profil – Règles et procédures pour l'évaluation de l'état de surface.
- [12] ISO 8785 Défauts de surface
- [13] ISO 12085 (NF E 05-020) 1996 État de surface : méthode du profil – Paramètres liés aux motifs.