



**TECHNIQUES
DE L'INGÉNIEUR**

Réf. : **R1231 V1**

États de surface - Mesure

Date de publication :
10 juin 2006

Cet article est issu de : **Mécanique | Frottement, usure et lubrification**

par **Bernard RAPHET**

Résumé Les surfaces industrielles produites par des moyens techniques présentent des irrégularités par rapport à la surface idéale. Les équipements destinés à la quantification de la topographie de surface se sont multipliés ces dernières années, grâce notamment à l'évolution des appareils de mesure à contact (ajout d'un troisième axe de mesure), de la microscopie à haute résolution, et du traitement de l'information et de l'image. Les techniques tridimensionnelles sont à la veille d'être utilisées en production.

Abstract

Pour toute question :
Service Relation clientèle
Techniques de l'Ingénieur
Immeuble Pleyad 1
39, boulevard Ornano
93288 Saint-Denis Cedex

Par mail :
infos.clients@teching.com
Par téléphone :
00 33 (0)1 53 35 20 20

Document téléchargé le : **29/10/2021**

Pour le compte : **7200039662 - ens paris saclay // 138.231.69.113**

© Techniques de l'Ingénieur | tous droits réservés

États de surface

Mesure

par **Bernard RAPHET**

*Responsable Qualité et responsable Formation d'ANNECY MÉTROLOGIE
Ancien responsable du service métrologie du CTDEC
(Centre technique de l'industrie du décolletage)*

1. Mesures des états de surface.....	R 1 231 - 2
1.1 Estimation des paramètres.....	— 2
1.2 Règles et procédures de vérification.....	— 2
1.3 Comparaison des valeurs mesurées des paramètres aux limites de tolérance.....	— 3
1.4 Expression du résultat.....	— 4
2. Équipements de mesure d'états de surface	— 5
2.1 Appareils à palpeur	— 5
2.2 Évaluation par comparaison viso-tactile	— 7
3. Raccordement des résultats de mesure d'états de surface.....	— 8
3.1 Étalons.....	— 8
3.2 Étalonnage de l'équipement.....	— 8
4. Topographie.....	— 11
4.1 Introduction.....	— 11
4.2 Paramètres de surface.....	— 12
4.3 Méthodes de mesure.....	— 13
Pour en savoir plus.....	Doc. R 1 232

Ce document est à lire à la suite du dossier [R 1 230].

Les dossiers [R 1 230] et [R 1 231] présentent, d'une manière non exhaustive, les connaissances actuellement admises dans le domaine de la caractérisation de surface à partir essentiellement d'une étude bibliographique et de l'expérience de l'auteur.

Dans le monde industriel, on retrouve aujourd'hui, la présence :

- de plans avec des paramètres correspondants aux anciennes normes (définitions différentes suivant les pays d'origine) ;
- de matériels d'ancienne génération (paramètres suivants anciennes normes avec un traitement du signal plus normalisé) ;
- de plans et équipements conformes à la normalisation en vigueur, mais que peu de gens utilisent correctement ;
- d'équipements permettant la caractérisation tridimensionnelle de l'état de surface, avec des méthodes de traitement différentes ;
- de documents prénormatifs des paramètres de surface.

Cette situation est due à la récente évolution de la normalisation, et au développement des équipements, à l'augmentation des performances du matériel informatique et des logiciels.

La **mesure tridimensionnelle de la microgéométrie** est actuellement le moyen le plus fidèle pour caractériser **une surface**. Elle permet l'observation, l'identification et la quantification des irrégularités. Elle permet également la réalisation d'études sur les corrélations entre la microgéométrie et la fonction ou le comportement d'une surface. Ces études devraient permettre notamment de préciser ou redéfinir les limites entre les différents écarts géométriques (forme, ondulation et rugosité), que ce soit sur un profil ou sur une surface.

En effet, si certaines fonctions nécessite la prise en compte de ces écarts géométriques séparément, d'autres nécessitent de les caractériser plus globalement (par exemple : forme + ondulation ou ondulation + rugosité ou forme + ondulation + rugosité).

Historiquement, l'état de surface a été évalué visuellement et/ou tactilement, puis mesuré sur un profil à l'aide de capteurs avec un traitement du signal plus ou moins performants (profilométrie), et enfin mesuré sur une partie de la surface (topographie). Les techniques tridimensionnelles ne sont plus réservées aux laboratoires de recherche. Les prototypes sont devenus des équipements industriels que l'on retrouve dans des laboratoires d'entreprises ou de sociétés de services. On peut imaginer qu'au niveau des équipements, les prochaines étapes seront la mesure tridimensionnelle d'état de surface en production et la mesure intégrale d'une surface entière (macro, microgéométrie, soit de façon séparée soit de façon globale).

1. Mesures des états de surface

1.1 Estimation des paramètres

L'élément à mesurer présente :

- des zones homogènes : les valeurs déterminées sur la surface entière doivent être utilisées pour la comparaison avec les exigences ;
- des zones non homogènes : les valeurs des paramètres déterminées sur chacune de ces zones doivent être utilisées séparément pour la comparaison avec les exigences.

Lorsque les exigences sont spécifiés par la limite supérieure du paramètre, il faut utiliser la ou les zones de la surface qui semblent présenter la valeur maximale du paramètre.

Si la direction n'est pas spécifiée, la pièce doit être positionnée de sorte que la direction de la section corresponde aux valeurs maximales des paramètres de hauteurs de rugosité de surface.

Les paramètres sont estimés sur une longueur d'évaluation. Ils sont définis (tableau 1) :

- soit sur une longueur de base ;
- soit sur la longueur d'évaluation. Il est donc nécessaire pour effectuer une mesure de connaître la longueur d'évaluation. Elle peut être imposée :
- par la spécification (longueur d'évaluation ou longueur de base) ;
- par la longueur de l'élément à mesurer ;
- ou par défaut.

Les valeurs par défaut, en fonction des familles de paramètres, sont précisées dans le tableau 2.

1.2 Règles et procédures de vérification

1.2.1 Paramètres de rugosité définis par rapport à la ligne moyenne

Afin d'isoler le profil de rugosité, il est important de choisir la longueur de base qui correspond le mieux au profil d'état de surface à mesurer. Le mauvais choix de la longueur d'onde de coupe pour la mesure peut :

- soit ne pas séparer correctement les écarts et donc laisser dans le profil des éléments de l'ondulation, la valeur des paramètres de rugosité sera surestimée ;

Tableau 1 – Estimation du paramètre		
Paramètre	Calcul intermédiaire	Calcul du paramètre
Paramètre défini par la longueur de base	Calcul du paramètre, avec les données de mesurage obtenues sur chaque longueur de base	Moyenne arithmétique des estimateurs du paramètre obtenus sur toutes les longueurs de base
Paramètre défini par la longueur d'évaluation		Calcul du paramètre, avec les données de mesurage obtenues sur la longueur d'évaluation

Tableau 2 – Valeurs par défaut de la longueur d'évaluation	
Paramètres	Longueur d'évaluation par défaut
Paramètres définis par rapport à la ligne moyenne	
Profil de rugosité <i>R</i>	longueur d'évaluation = 5 × longueur de base
Profil d'ondulation <i>W</i>	aucune
Profil primaire <i>P</i>	longueur totale de l'élément
Paramètres définis par rapport aux motifs	
Profil de rugosité <i>R</i>	16 mm
Profil d'ondulation <i>W</i>	16 mm
Paramètres définis par rapport à la courbe de portance	
Profil de rugosité <i>R</i>	longueur d'évaluation = 5 × longueur de base
Profil de rugosité <i>R</i> lié aux motifs	16 mm
Profil primaire <i>P</i>	longueur totale de l'élément

— soit trop filtrer le profil et réduire la hauteur des éléments du profil, la valeur des paramètres de rugosité sera sous-estimée.

Tableau 3 – Choix de la longueur de base en fonction du profil de rugosité

Nature du paramètre	Profil de rugosité				Conditions de mesure à appliquer	
	non périodique			périodique		
Paramètre spécifié	$Ra - Rq - Rsk - Rku - Rdq$	$Rz - Rp - Rv - Rc - Rt$	RSm	tous les paramètres		
Paramètre à estimer	Ra (μm)	Rz (μm)	RSm (mm)	RSm (mm)	Longueur de base λc (mm)	Longueur d'évaluation ℓn (mm)
Estimation	$0 < Ra < 0,02$	$0 < Rz < 0,1$	$0,013 < RSm < 0,04$		0,08	0,4
	$0,02 < Ra < 0,1$	$0,1 < Rz < 0,5$	$0,04 < RSm < 0,13$		0,25	1,25
	$0,1 < Ra < 2$	$0,5 < Rz < 10$	$0,13 < RSm < 0,4$		0,8	4
	$2 < Ra < 10$	$10 < Rz < 50$	$0,4 < RSm < 1,3$		2,5	12,5
	$10 < Ra < 80$	$50 < Rz < 200$	$1,3 < RSm < 4$		8	40

Tableau 4 – Conditions de mesure recommandées pour les paramètres liés aux motifs

A (mm)	B (mm)	Longueur d'exploration (mm)	Longueur d'évaluation (mm)	λs (mm)	Rayon maximal de la pointe du palpeur (μm)
0,02	0,1	0,64	0,64	0,002 5	$2 \pm 0,5$
0,1	0,5	3,2	3,2	0,002 5	$2 \pm 0,5$
0,5	2,5	16	16	0,008	5 ± 1
2,5	12,5	80	80	0,025	10 ± 2

Sauf spécifications particulières, les valeurs par défauts sont : $A = 0,5$ mm et $B = 2,5$ mm (en gras).

Si la longueur de base est spécifiée comme exigence, la longueur d'onde de coupure, λc , doit être choisie égale à cette longueur de base.

Lorsque la spécification de rugosité ne précise pas la longueur de base :

- choisir la longueur de base, à partir du tableau 3, en fonction du type de profil de rugosité, du paramètre spécifié sur le plan et de l'estimation du paramètre Ra ou Rz ou RSm ;
- effectuer une mesure du paramètre Ra ou Rz ou RSm dans les conditions de mesure déterminée ;
- comparer ce résultat à la plage de valeurs données dans le tableau 3 ;
- si la valeur mesurée est en dehors de la plage des valeurs correspondants à la longueur de base estimée, régler l'instrument sur la valeur de la longueur de base correspondant au paramètre mesuré. Faire un nouveau mesurage dans ces nouvelles conditions et comparer le nouveau résultat aux valeurs du tableau 3. Les valeurs devraient se situer dans la plage ;
- effectuer la mesure du paramètre spécifié.

1.2.2 Paramètres définis par rapport aux motifs

Alors que la longueur d'onde de coupure permet de séparer les écarts de rugosité et d'ondulation pour les paramètres liés à la ligne moyenne, ce sont les opérateurs A et B qui sont utilisés pour effectuer cette séparation pour les paramètres liés aux motifs. Les conditions de mesure, et notamment les opérateurs A et B , recommandées sont précisées dans le tableau 4.

Pour calculer les paramètres d'ondulation, le profil primaire doit être mesuré par rapport à une référence de guidage.

Tableau 5 – Choix de la longueur d'onde de coupure pour séparer les écarts géométriques

Longueur d'onde de coupure λc (mm)	Longueur d'évaluation ℓn (mm)
0,8	4
2,5	12,5
En gras : conditions recommandées.	

1.2.3 Paramètres définis par rapport à la courbe de portance

Pour mesurer les paramètres définis par rapport à la courbe de portance, l'utilisation d'un équipement avec référence de guidage est recommandée.

La longueur d'onde de coupure utilisée pour séparer les écarts géométriques est à choisir dans le tableau 5.

1.3 Comparaison des valeurs mesurées des paramètres aux limites de tolérance

Il existe deux façons différentes d'interpréter la limite des spécifications d'état de surface.

1.3.1 Règle des 16 %

Lorsque les exigences sont spécifiées par la limite supérieure du paramètre, la surface est considérée comme étant acceptable si au

Tableau 6 – Règles applicables pour les différentes familles de paramètres		
Paramètres définis par rapport	Règle des 16 %	Règle de la valeur maximale
à la ligne moyenne	X	X
aux motifs	X	
à la courbe de portance	X	X

maximum 16 % de toutes les valeurs mesurées du paramètre considéré, obtenues sur une longueur d'évaluation, dépassent la valeur spécifiée.

Lorsque les exigences sont spécifiées par la limite inférieure du paramètre, la surface est considérée comme étant acceptable si au maximum 16 % de toutes les valeurs mesurées du paramètre considéré obtenues sur une longueur d'évaluation sont dépassées par la valeur spécifiée.

16 % correspond à une valeur mesurée sur 6, hors de la limite spécifiée, ou 2 valeurs sur 12, etc.

1.3.2 Règle de la valeur maximale

Lorsque les exigences sont spécifiées par la valeur maximale du paramètre, aucune des valeurs mesurées du paramètre de rugosité sur l'ensemble de la surface à contrôler ne doit dépasser la valeur spécifiée.

Pour désigner la valeur maximale admissible du paramètre, le suffixe « max. » doit être ajouté au symbole du paramètre.

Exemple : $R_{zmax} 10$.

1.3.3 Règles applicables pour chaque famille de paramètres

La règle à appliquer par défaut est la règle des 16 %. L'application de ces règles pour les différentes familles de paramètres est précisée dans le tableau 6.

1.3.4 Évaluation du paramètre

Les paramètres d'état de surface ne servent pas à la description des défauts de surface. Les défauts de surface tels que rayures et pores ne doivent pas être pris en considération lors de la vérification de l'état de surface.

Pour décider si une surface est conforme ou non à la spécification, une série de valeurs du paramètre d'état de surface doit être utilisée, chacune déterminée à partir d'une longueur d'évaluation.

La fiabilité de la décision de conformité et la précision de la valeur moyenne obtenue dépendent du nombre de longueurs de base, à l'intérieur de la longueur d'évaluation sur lesquelles la valeur du paramètre d'état de surface est obtenue et aussi du nombre de longueurs d'évaluation, c'est-à-dire du nombre de mesurages le long de la surface.

Pour les paramètres R , si la longueur d'évaluation ne comporte pas 5 longueurs de base, leurs limites supérieure et inférieure doivent être recalculées et ramenées à une longueur d'évaluation égale à 5 longueurs de base, en appliquant la formule suivante :

$$\sigma_5 = \sigma_n \sqrt{n/5}$$

avec n le nombre de longueurs de base utilisées (inférieur à 5).

Exemple :

- valeur spécifiée sur le plan : $Ra 1,6 \mu m$;
- longueur de l'élément spécifié : $3,5 \text{ mm}$;
- longueur de base sélectionnée : $0,8 \text{ mm}$;
- longueur d'évaluation, par défaut : 4 mm ($5 \times 0,8 \text{ mm}$).

Il est donc impossible d'effectuer la mesure.

La règle à appliquer est alors la suivante.

- Prendre le nombre maximal de longueur de base possible pour effectuer la mesure.

Dans notre cas, le nombre de longueur de base est 3 ($3 \times 0,8 = 2,4 \text{ mm}$). La longueur de palpé sera égale à $3,2 \text{ mm}$ ($2,4 \text{ mm} + 0,8 \text{ mm}$), 1 longueur de base étant nécessaire pour le fonctionnement correct de l'appareil.

La solution la plus utilisée dans l'industrie est le choix d'une longueur de base plus petite ($0,25 \text{ mm}$ par exemple), qui réduit ainsi la longueur de palpé à $1,5 \text{ mm}$. Ce choix n'est pas conseillé, une longueur d'onde de coupe trop petite risque de réduire l'amplitude du signal caractérisant l'amplitude des stries de rugosité de façon importante, réduisant ainsi la valeur du paramètre spécifié.

- Recalculer la limite en appliquant la formule suivante :

$$Ra = \sqrt{\frac{3}{5}} \times 1,6 = 1,24 \mu m$$

avec $1,6$ la valeur du paramètre spécifié sur le plan ($1,6 \mu m$),
 $1,24 \mu m$ la valeur recalculée en fonction des conditions de palpé utilisées.

1.4 Expression du résultat

La mesure est un résultat de mesure et une incertitude de mesure. Le compte-rendu de la mesure devrait indiquer au minimum :

- le type d'instrument utilisé ;
- le type de palpé et la valeur du rayon ;
- le type de filtre ;
- la longueur de base ;
- la longueur d'évaluation ou le nombre de longueur de base ;
- l'incertitude de mesure.

Dans le domaine de l'état de surface l'incertitude est exprimée en pour-cent. Elle est évaluée à partir des composantes suivantes :

- écart-type de répétabilité, obtenu sur une série de mesures ;
- incertitude-type sur la valeur des étalons de référence, calculée à partir de l'incertitude donnée sur le certificat d'étalonnage ;
- erreur de justesse, écart entre la valeur de l'étalon et la moyenne d'une série de mesures de l'étalon sur l'appareil.

Des exemples d'incertitude de mesure sont donnés dans le tableau 7.

Tableau 7 – Exemples d'incertitude de mesure								
Type de mesure	Incertitude de mesure							
	Ra (en μm)		Rz (en μm)		Rt (en μm)		R (en μm)	
	< 0,2	> 0,2	< 1	> 1	< 2	> 2	< 0,8	> 0,8
Étalon étalonné dans un laboratoire de référence	± 4 %	± 2 %	± 10 %	± 3 %	± 18 %	± 5 %	± 3 %	± 1 %
Étalon étalonné dans un laboratoire industriel	± 15 %	± 5 %	± 15 %	± 5 %	± 20 %	± 10 %	± 10 %	± 5 %
Pièce mesurée en entreprise	± 20 %	± 10 %	± 20 %	± 10 %	± 25 %	± 20 %	± 15 %	± 10 %

2. Équipements de mesure d'états de surface

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

- soit couramment dans l'industrie, appareil à palpeur avec contact, échantillons de comparaison viso-tactile ;
- soit plus rarement pour des applications spécifiques, appareil à palpeur sans contact, méthodes optiques ;
- soit encore plus rarement dans des laboratoires de recherche et développement, méthodes optiques, par photogrammétrie.

Dans l'industrie le moyen le plus utilisé est l'appareil d'état de surface à palpeur avec contact du palpeur avec la surface à caractériser.

2.1 Appareils à palpeur

Ce type d'équipement, suivant son degré de perfectionnement, permet la mesure de tout ou partie des paramètres définis précédemment. En effet, l'évaluation des paramètres de profil primaire et d'ondulation nécessite une référence de guidage externe. La figure 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 palpé, avec la pointe du palpeur, et le transducteur ;
- **élément de palpé** : élément qui transmet le déplacement de la pointe du palpeur au transducteur ;
- **pointe du palpeur** : élément constitué d'un cône nominale-ment circulaire ayant un angle défini et d'une extrémité nominale-ment 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.

2.1.1 Valeurs nominales des caractéristiques des appareils

La forme idéale du palpeur est un cône, d'angle 60° de préférence ou 90°, avec une pointe sphérique de rayon, r_{tip} , de 2 μm , 5 μm ou 10 μm . La force de mesure statique nominale du palpeur est de 0,000 75 N.

Les longueurs d'onde de coupure normalisées du filtre de profil sont :

0,08 mm ; 0,25 mm ; 0,8 mm ; 2,5 mm ; 8 mm

En général, l'état de surface est défini dans une bande de transmission, gamme de longueurs (tableau 8) :

- entre 2 filtres définis, filtre passe-bas qui coupe les longueurs d'onde courte et filtre passe-haut qui coupe les longueurs d'onde longue ;
- entre 2 limites pour la méthode des motifs.

Tableau 8 – Bande de transmission définissant l'état de surface		
Paramètres	Filtre passe-bas	Filtre passe-haut
Paramètres définis par rapport à la ligne moyenne		
Profil R – paramètres de rugosité	λ_s	λ_c
Profil W – paramètres d'ondulation	λ_c	λ_f
Profil P – paramètres de profil primaire	λ_s	–
Paramètres définis par rapport aux motifs		
Profil R – paramètres de rugosité	λ_s , 0,008 mm par défaut	A
Profil W – paramètres d'ondulation	A	B
Paramètres définis par rapport à la courbe de portance		
Profil R – paramètres de rugosité	0,002 5 mm	0,8 mm

Tableau 9 – Relation entre longueur d'onde de coupure λ_c , rayon de pointe et rapport des longueurs de coupure

λ_c (mm)	λ_s (mm)	λ_c / λ_s	r_{tip} max. (μm)	Intervalle maximal d'échantillonnage (μm)
0,08	0,002 5	30	2	0,5
0,25	0,002 5	100	2	0,5
0,8	0,002 5	300	2 (1)	0,5
2,5	0,008	300	5 (2)	1,5
8	0,025	300	10 (2)	5

(1) Pour les surfaces avec $Ra > 0,5 \mu\text{m}$ ou $Rz > 3 \mu\text{m}$, $r_{tip} = 5 \mu\text{m}$ peut en général être utilisé sans différence significative sur le résultat de mesure.

(2) Pour les longueurs d'onde de coupure λ_s de 2,5 μm et 8 μm , il est presque certain que l'atténuation due au filtrage mécanique d'un palpeur ayant le rayon de pointe recommandé se situera en dehors de la bande de transmission définie.

Le tableau 9 définit les relations normalisées entre les longueurs d'onde de coupure, le rayon de pointe du palpeur et la distance maximale entre les points de numérisation.

2.1.2 Filtre

Le filtre est utilisé pour séparer les écarts géométriques. Le filtre λ_c génère la ligne moyenne qui correspond également au profil d'ondulation. Ce filtre, à phase correcte, est caractérisé par trois paramètres.

■ La longueur d'onde limite λ_c (cut-off)

Les longueurs d'onde de coupure normalisées du filtre de profil sont :

0,08 mm ; 0,25 mm ; 0,8 mm ; 2,5 mm ; 8 mm

■ La fonction de pondération (figure 2)

Ce filtre est basé sur une pondération mathématique du profil réalisée à l'aide d'une courbe gaussienne définie sur une longueur égale à la longueur d'onde de coupure. Cette courbe glisse de point en point sur le profil total. À chaque position, un point résultat est calculé par application de la formule de pondération sur les points situés sur la largeur de la courbe, $\lambda c o$.

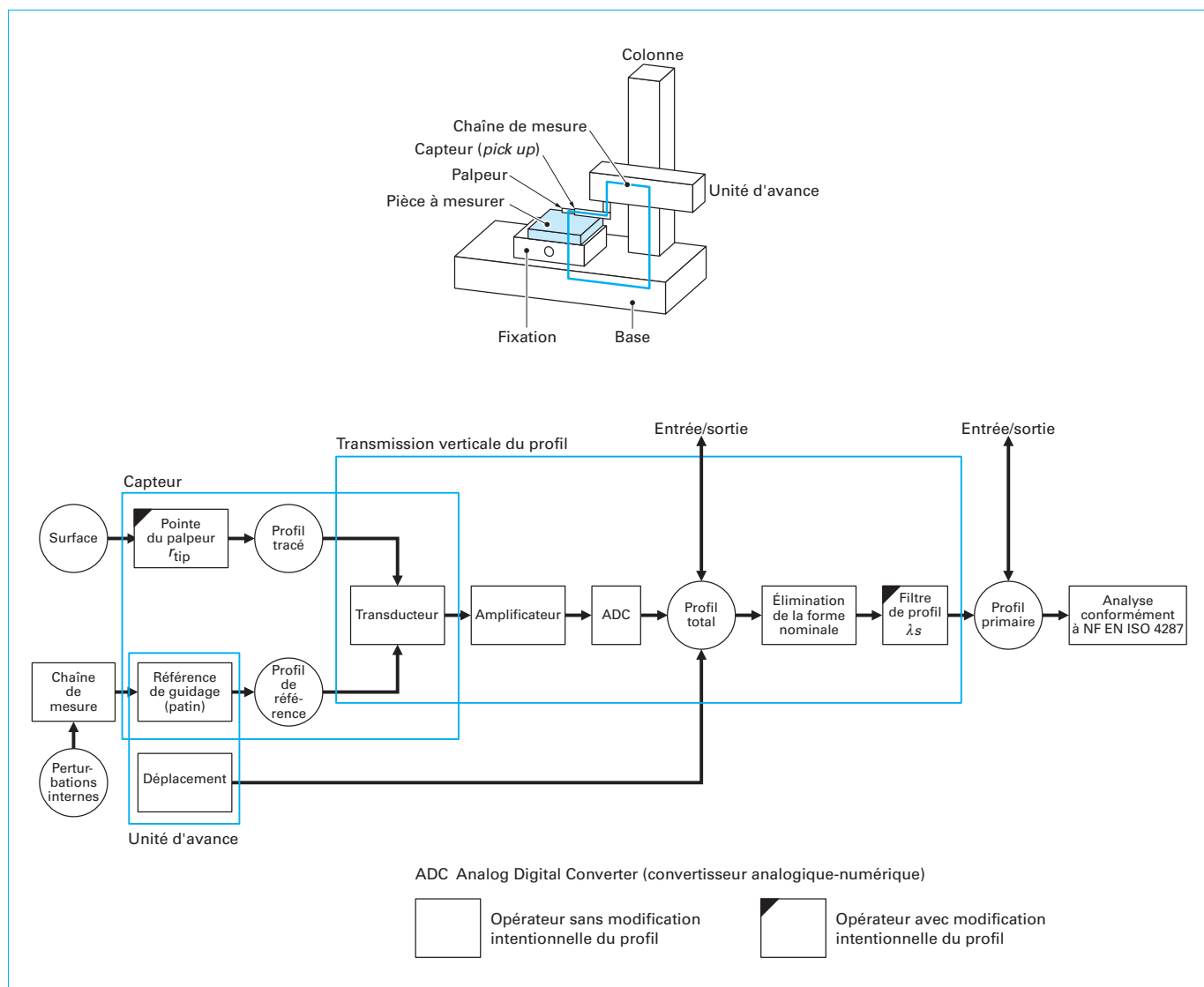


Figure 1 – Représentation schématique d'un appareil à palpeur

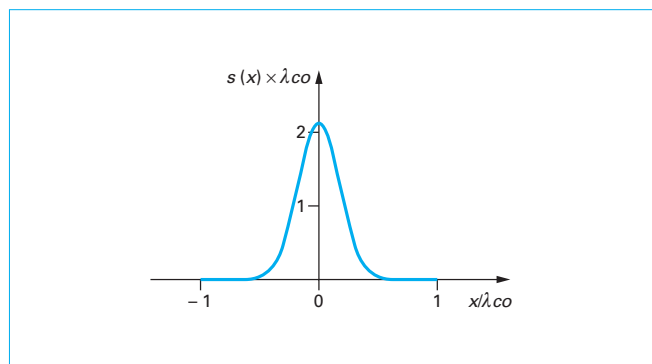


Figure 2 – Fonction de pondération du filtre de profil

Pour une longueur d'onde de coupure λ_{co} , l'équation est la suivante :

$$s(x) = \frac{1}{\alpha \lambda_{co}} \exp - \pi \left(\frac{x}{\alpha \lambda_{co}} \right)^2$$

avec x position par rapport au centre de la fonction de pondération,

λ_{co} longueur d'onde de coupure du filtre de profil,

$$\alpha = \sqrt{\frac{\ln 2}{\pi}} = 0,4697$$

■ Le pourcentage de transmission (figure 3)

Ce type de filtre offre un coefficient de transfert de 50 % pour une longueur d'onde égale à la longueur d'onde de coupure.

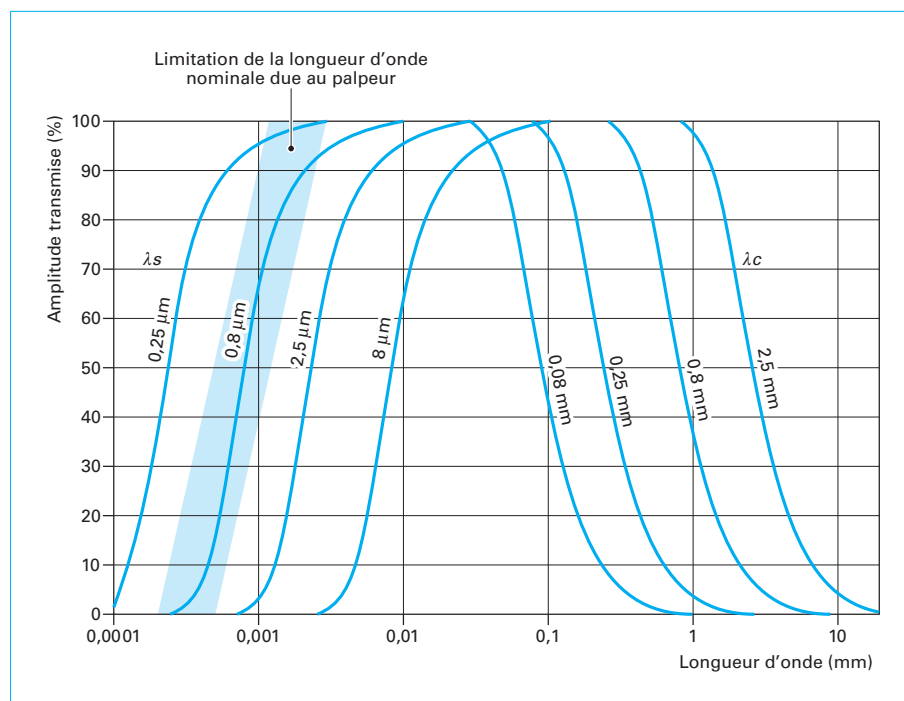


Figure 3 – Caractéristiques de transmission des filtres λ_c et λ_s

● Caractéristique de transmission de la composante du profil à longueur d'onde longue (ligne moyenne)

La caractéristique du filtre est déterminée à partir de la fonction de pondération au moyen de la transformée de Fourier. La caractéristique du filtre pour la ligne moyenne correspond à l'équation suivante :

$$\frac{a_1}{a_0} = \exp - \pi \left(\frac{\alpha \lambda_{co}}{\lambda} \right)^2$$

avec a_0 amplitude d'un profil de rugosité sinusoïdal avant filtrage,

a_1 amplitude de la ligne moyenne de ce profil sinusoïdal,

λ_{co} longueur d'onde de coupure du filtre de profil,

λ longueur d'onde du profil sinusoïdal.

● Caractéristique de transmission de la composante du profil à longueur d'onde courte

La caractéristique de transmission de la composante du profil à longueur d'onde courte est complémentaire à celle de la composante à longueur d'onde longue.

La composante à longueur d'onde courte est la différence entre le profil de la surface et la composante à longueur d'onde longue. L'équation en fonction de la longueur d'onde limite λ_{co} est :

$$\frac{a_2}{a_0} = 1 - \exp - \pi \left(\frac{\alpha \lambda_{co}}{\lambda} \right)^2 \text{ soit } \frac{a_2}{a_0} = 1 - \frac{a_1}{a_0}$$

avec a_2 amplitude du profil de rugosité sinusoïdal.

2.1.3 Capteurs sans contact

Ces équipements peuvent être équipés de capteurs sans contact, à diode laser. Le faisceau est focalisé pour former sur la surface une tache d'environ 2 μm .

Ce type de capteur permet la mesure sur des pièces déformables ou sur des surfaces sensibles, verre, charbon, caoutchouc, vernis, plastique, sans détérioration.

L'utilisation de ce capteur n'est possible que sur des surfaces réfléchissantes.

2.1.4 Appareils de la génération précédente

Ces appareils analogiques mettent en œuvre des filtres composés de deux modules successifs constitués d'une résistance et d'un condensateur (filtre RC). Ces filtres provoquent un déphasage et une déformation du signal plus ou moins importante.

De plus ces appareils, dans leur version atelier, sont équipés de palpeurs à patin qui rendent la mesure plus facile, mais ne permettent que la mesure des paramètres de rugosité.

2.2 Évaluation par comparaison viso-tactile

Le principe consiste à comparer la surface spécifiée à des échantillons de comparaison viso-tactile. Ces échantillons sont des reproductions de surfaces réelles réalisées généralement par électroformage, caractérisés par un ou plusieurs paramètres d'états de surface ayant des valeurs connues. Pour chaque procédé de fabrication, fraisage, tournage, rabotage, rectification, rodage, électroérosion, ..., les échantillons sont échelonnés suivant la gamme de valeurs nominales de Ra suivante :

$$0,05 - 0,1 - 0,2 - 0,4 - 0,8 - 1,6 - 3,2 - 6,3 - 12,5 \mu\text{m}$$

Par simple comparaison visuelle et tactile, il est facile de situer l'état de surface de la pièce entre deux échantillons successifs.

Son utilisation se limite à :

- faciliter le choix de la valeur limite du paramètre à spécifier, pour les bureaux d'étude ;
- aider au choix du procédé de fabrication ;
- aider au réglage de la fabrication ;
- surveiller, en fabrication, la constance et la qualité des surfaces.

3. Raccordement des résultats de mesure d'états de surface

3.1 Étalons

3.1.1 Mesures matérialisées

L'étalonnage des instruments dans leurs divers modes de fonctionnement nécessite plusieurs types d'étalons. Chacun de ces étalons a un domaine d'application limité en fonction de ces caractéristiques (tableau 10).

Le tableau 11 décrit les différents étalons définis par la normalisation.

3.1.2 Étalonnage des étalons matérialisés

Les caractéristiques métrologiques des étalons matérialisés sont déterminées par un étalonnage. Il est essentiel de pouvoir relier ces valeurs au système international d'unités, SI.

Les laboratoires nationaux des principaux pays industrialisés ont signé un accord de reconnaissance mutuelle (MRA) de leurs étalons et des certificats d'étalonnage qu'ils émettent.

Dans chaque pays, des organismes d'accréditation reconnaissent les compétences des laboratoires d'étalonnage pour des domaines bien définis avec des incertitudes de mesure maîtrisées. En France, cet organisme est le COFRAC (COMité FRANçais d'ACcréditation). Les principaux organismes d'accréditation européens et mondiaux ont signé des accords de reconnaissance mutuelle des certificats d'étalonnage émis dans le cadre d'accréditation.

Dans le domaine des états de surface, il n'y a, à ce jour en France, que des laboratoires d'étalonnage accrédités COFRAC avec des incertitudes de mesure plus ou moins importantes.

Pour le raccordement des étalons d'états de surface, en fonction des incertitudes de mesure recherchées, il faut s'adresser :

- soit à un laboratoire d'étalonnage accrédité COFRAC (www.cofrac.fr) ;
- soit à un laboratoire d'étalonnage étranger reconnu (www.european-accreditation.org) ou (www.ilac.org) ;
- soit à un laboratoire national de métrologie (www.bipm.fr).

Dans le cadre de son programme de développement, le Laboratoire National de Métrologie et d'Essais (LNE) a entrepris des travaux visant à mettre en place des références nationales pour la mesure des états de surface.

3.1.3 Étalons logiciels

■ Étalon logiciel

Donnée ou logiciel de référence destinée à reproduire la valeur d'un mesurande avec une incertitude connue afin de vérifier par comparaison le logiciel utilisé pour calculer le mesurande dans un instrument de mesure.

■ Étalons logiciels de type F

Ces étalons logiciels sont conçus pour vérifier les logiciels des instruments de mesure, c'est-à-dire les algorithmes de filtrage et de calcul de paramètres.

● **Type F1, données de référence** : ces étalons logiciels sont des fichiers de données informatiques fournissant une représentation numérique de l'ensemble d'une surface ou d'un profil, calibre virtuel, sur un support d'enregistrement adapté. Ces données sont entrées dans le logiciel soumis vérification. Les résultats obtenus sont comparés aux résultats indiqués sur le certificat d'étalonnage du calibre virtuel.

Tableau 10 – Les types d'étalons	
Type	Nom
A	Étalon de profondeur
B	Étalon de l'état de la pointe du palpeur
C	Étalon d'espacement
D	Étalon de rugosité
E	Étalon de coordonnées du profil

● **Type F2, logiciel de référence** : ces étalons logiciels sont des logiciels de référence informatiques et raccordables. Ils sont utilisés pour essayer les logiciels en entrant un ensemble commun de données dans le logiciel soumis à l'essai ou à l'étalonnage et dans le logiciel de référence, puis en comparant les résultats obtenus avec le logiciel soumis à l'essai aux résultats certifiés du logiciel de référence. Il peut être utilisé pour certifier les étalons logiciels de type F1.

3.2 Étalonnage de l'équipement

3.2.1 Définitions

Étalonnage : ensemble des opérations établissant, dans des conditions spécifiées, la relation entre les valeurs de la grandeur indiquées par un appareil de mesure ou un système de mesure, ou les valeurs représentées par une mesure matérialisée.

Traçabilité : propriété du résultat d'un mesurage ou d'un étalon tel qu'il puisse être relié à des références déterminées, généralement des étalons nationaux ou internationaux, par l'intermédiaire d'une chaîne ininterrompue de comparaisons ayant toutes des incertitudes déterminées.

Étalonnage d'une configuration : l'instrument à contact (palpeur) doit être étalonné à chaque modification des éléments de base du système, qui modifie intentionnellement ou non le profil mesuré. Chaque configuration de l'instrument à contact (palpeur) doit être étalonnée séparément.

Lieu de l'étalonnage : il est recommandé que l'instrument à contact soit étalonné sur son lieu d'utilisation, en présence de conditions environnementales similaires à celles qui existeront lors des mesurages, pour tenir compte des facteurs d'influence externes (bruit, température, vibrations...).

3.2.2 Étalons de mesure

En fonction du mode de fonctionnement de son équipement et de son utilisation, il faudra déterminer les opérations d'étalonnage à effectuer.

Les principaux étalons permettant l'étalonnage d'un instrument à contact sont :

- verre plan ;
- cales étalons ;
- étalon de profondeur : type A ;
- étalon d'espacement : type C ;
- étalon de rugosité : type D ;
- étalon de coordonnées de profil : type E ;
- étalon logiciel : type F.

Ces étalons sont actuellement définis par la normalisation. La principale difficulté est de les acquérir. On trouve, sur le marché, essentiellement des étalons de type D ou C.

Tableau 11 – Description des différents étalons

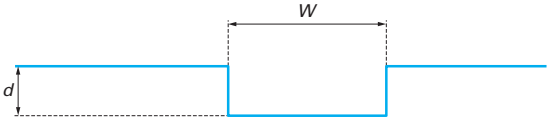
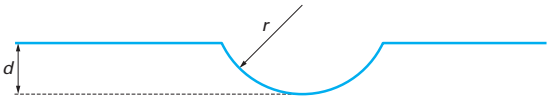
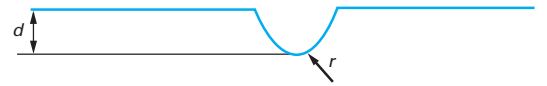
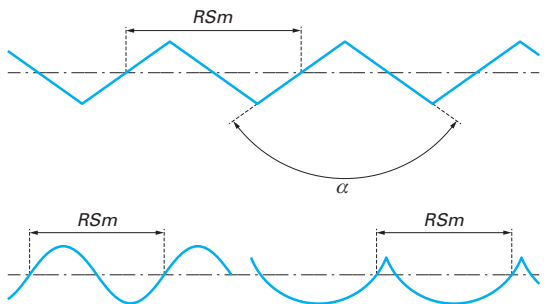
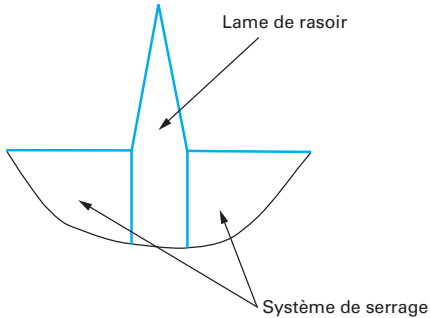
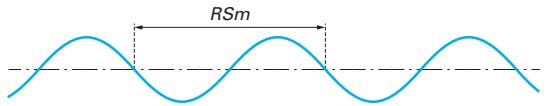
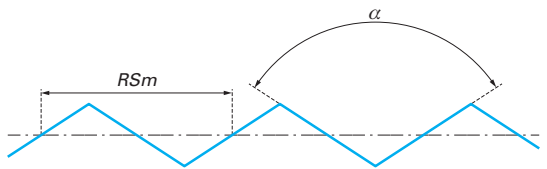
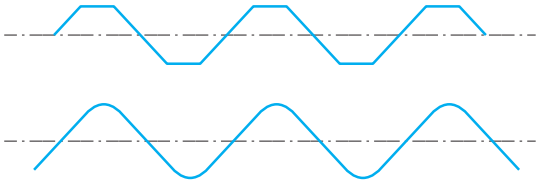
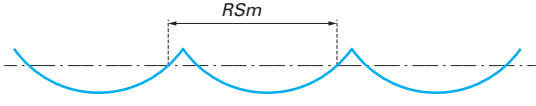
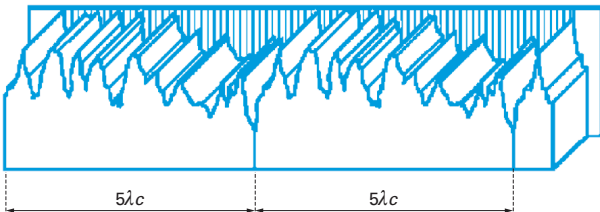
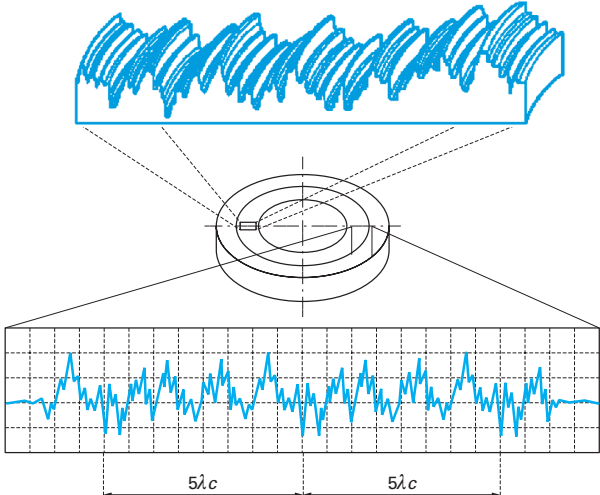
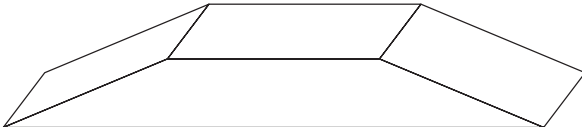
Type		Description	
A	A1	Rainures larges à fond plat	
	A2	Rainures larges à fond arrondi	
B	B1	Rainure étroite à fond arrondi	
	B2	2 réseaux de rainures de valeur Ra identique avec 2 profils différents, l'un sensible et l'autre non sensible aux dimensions de la pointe du palpeur	
	B3	Fine arête protubérante En pratique, on utilise une lame de rasoir non revêtue. La largeur de l'arête est d'environ 0,1 μm .	
C	C1	Rainures à profil sinusoïdal	
	C2	Rainures à profil en triangle isocèle	

Tableau 11 – Description des différents étalons (suite et fin)

Type		Description	
C	C3	Rainures sinusoïdales simulées	
	C4	Rainures à profil en arcs de cercle	
D	D1	Profils unidirectionnels irréguliers	
	D2	Profils circulaires irréguliers	
E	E1	Sphère ou hémisphère de précision	
	E2	Prisme de précision	

3.2.3 Caractéristiques métrologiques des instruments à contact

Les principales caractéristiques métrologiques sont :

- justesse du capteur ;
- rectitude de déplacement du capteur, dans le cas de référence externe ;
- erreur d'indication de la position horizontale.

3.2.4 Étalonnage

3.2.4.1 Préparation

Avant l'étalonnage de l'instrument, il est nécessaire de vérifier :

- le bon fonctionnement de l'instrument ;
- l'état de la pointe du palpeur, soit en utilisant un étalon de type B, soit par observation à un très gros grossissement.

3.2.4.2 Étalonnage du profil résiduel

Le verre plan exempt de rayures reproduit le profil résiduel. Il est possible d'établir l'influence de la rectitude de la référence externe, des conditions d'environnement et du bruit de l'instrument.

L'étalonnage consiste :

- au palpement du verre plan ;
- au calcul des paramètres P_t et P_q ;
- à la détermination des écarts.

3.2.4.3 Étalonnage de la composante verticale du profil

L'étalon de profondeur, de type A, reproduit la profondeur du profil afin de mesurer l'erreur d'indication de la composante verticale du profil. En l'absence d'étalon de profondeur, il est possible d'utiliser des cales étalons.

Attention à l'incertitude sur la hauteur des étages de cales !

L'étalonnage consiste :

- au palpement de l'étalon de profondeur ou de l'empilage de cales ;
- à la détermination de la profondeur de la rainure ou de la différence de hauteur entre les cales.

3.2.4.4 Étalonnage de la composante horizontale du profil

L'étalon d'espacement, de type C, reproduit la largeur moyenne d'un élément de profil, PS_m , afin de mesurer l'erreur d'indication de la composante horizontale du profil.

L'étalonnage consiste :

- au palpement de l'étalon d'espacement ;
- au calcul du paramètre PS_m ;
- à la détermination des écarts.

3.2.4.5 Étalonnage du système de coordonnées du profil

Le verre plan incliné reproduit :

- l'angle des moindres carrés ;
- la hauteur totale du profil primaire, P_t , après suppression de la droite des moindres carrés établissant ainsi l'erreur sur les coordonnées horizontale et verticale ensemble, c'est-à-dire variation dans la vitesse de déplacement, non-linéarité des échelles, ...

L'étalon de coordonnées du profil reproduit la hauteur totale du profil primaire, P_t , après suppression de la forme nominale des moindres carrés, établissant ainsi le système de coordonnées.

L'étalonnage consiste :

- au palpement du verre plan incliné ou de l'étalon de coordonnées de profil, de type E ;
- au calcul du paramètre P_t après suppression de la forme nominale ;
- à la détermination des écarts.

3.2.4.6 Étalonnage de l'instrument à contact dans son ensemble

■ Paramètres liés à la ligne moyenne

L'étalon de rugosité, de type D, reproduit, en établissant ainsi une vérification globale de l'instrument à contact :

- l'écart moyen arithmétique R_a ;
- la hauteur maximale du profil R_z .

L'étalonnage consiste :

- au palpement de l'étalon de rugosité ;
- au calcul des paramètres R_a et R_z ;
- à la détermination des écarts.

■ Paramètres liés aux motifs

Les étalons de rugosité, de type C4, reproduisent, en établissant ainsi une vérification globale de l'instrument à contact :

- pour les étalons avec un pas de 0,25 mm : la profondeur moyenne des motifs de rugosité R et le pas moyen des motifs de rugosité AR ;
- pour les étalons avec un pas de 0,8 mm : la profondeur moyenne des motifs d'ondulation W et le pas moyen des motifs d'ondulation AW .

L'étalonnage consiste :

- au palpement de l'étalon ;
- au calcul des paramètres R et AR ou W et AW ;
- à la détermination des écarts.

3.2.5 Étalonnage simplifié des instruments (palpeurs à patin)

Seule la vérification du bon fonctionnement et l'étalonnage de l'instrument dans son ensemble à l'aide d'un ou plusieurs étalons de rugosité de type D sont généralement réalisés.

4. Topographie

4.1 Introduction

La caractérisation de l'état d'une surface ne peut se limiter à l'analyse d'une trajectoire. Vouloir caractériser l'intégralité d'une surface ou d'une portion de surface est l'objectif recherché pour connaître son relief, sa texture et ses défauts de surface. Les avancées technologiques repoussent toujours la connaissance et la mesure des états de surface. Ces dernières années ont vu un grand développement d'équipements destinés à la quantification de la topographie de surface, grâce à l'évolution :

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

La mesure tridimensionnelle des états de surface dépasse le cadre du contrôle qualité des surfaces sur des produits industriels. L'image tridimensionnelle permet d'augmenter les possibilités d'analyse de la texture des surfaces.

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

Les premiers travaux de recherche au niveau européen ont été menés par l'École Centrale de Lyon et l'équipe de l'Université de Birmingham, dans le cadre d'un contrat européen intitulé « *The development of methods for the characterisation of roughness in three dimensions* », entre 1990 et 1995.

Entre 1998 et 2001, le programme de recherche européen SURF-
STAND a réuni des industriels de différents secteurs d'activité, des
constructeurs d'équipements de mesure d'états de surface et des
universités. Les résultats issus de ces recherches seront repris au
niveau international au travers d'une norme ISO « Spécification
géométrique des produits (GPS) – États de surfaces : surfacique »
qui sera structurée suivant la matrice GPS (voir [R 1 230] § 1.2).

Afin de disposer rapidement de documents normatifs, la norma-
lisation française a décidé de publier trois normes expérimentales :

- termes, définitions, et paramètres ;
- caractéristiques métrologiques des instruments à contact ;
- étalons et étalonnage des instruments à contact.

La détection de défauts de surface comme les fissures, les
rayures, les trous, etc., fait généralement appel à des technologies
utilisées pour le contrôle non destructif (ultrasons, courants de
Foucault, etc.) ou la vision industrielle dans le cas de contrôle à
100 % de produits.

4.2 Paramètres de surface

4.2.1 Séparation des écarts géométriques

L'échantillonnage de la topographie d'une surface s'effectue par
l'acquisition d'un certain nombre de points équidistants d'un pas
régulier en X et en Y.

Le traitement débute par le dégauchissage (redressement) de la
surface palpée. Cette opération nécessite la détermination du plan
des moindres carrés. Cette méthode vise à minimiser les variations
par rapport à chacun des coefficients du plan moyen.

Par analogie à la terminologie utilisée en profilométrie 2D, les
principales composantes qui constituent l'information mesurée sur
une surface, sont :

- la forme ;
- l'ondulation ;
- la rugosité.

La principale différence est la prise en compte de la direction de
ces composantes. En effet, la direction de la forme, de l'ondulation
et de la rugosité peuvent être différentes. L'orientation des compo-
santes topographiques d'une surface est mis en évidence par
l'analyse du spectre de Fourier.

La seconde étape du traitement est le filtrage, qui consiste à
séparer les différentes composantes de la surface. Le principe est
de passer de la surface réelle à la surface souhaitée par l'utilisation
de filtres suivant que l'on veuille obtenir une surface primaire, une
surface d'ondulation ou une surface de rugosité. Les différents
filtres permettent :

- d'éliminer la forme de la surface primaire ;
- d'éliminer les composantes de très faible échelle (bruit de
fond) de la surface réelle et d'obtenir ainsi la surface d'ondulation ;
- de séparer les composantes de faible échelle ou de grande
échelle de la surface primaire et d'obtenir la surface de rugosité.

Naturellement le filtrage gaussien utilisé sur le profil, tel que
défini au paragraphe 2.1.2, a été étendu à la surface (3D). Il peut
être anisotrope, c'est-à-dire variable suivant la direction, ou
isotrope, c'est-à-dire insensible à la direction.

D'autres méthodes de filtrage sont en cours d'étude, permettant
une représentation plus fidèle de la surface en suivant mieux sa
forme générale et en n'étant pas affecté par la présence de creux
ou de pics. Il s'agit de filtres morphologiques, filtres robustes,
filtres par splines, filtres en ondelettes, etc.

Il est bien évident que le résultat des paramètres calculés dépend
du type de filtre utilisé, d'où l'importance de normaliser les
méthodes (figure 4).

■ Définition des termes de la figure 4

- Surface réelle : ensemble des éléments qui existent physi-
quement et séparent la totalité de la pièce de son environnement.
- Surface extraite : représentation de la surface primaire
échantillonnée.

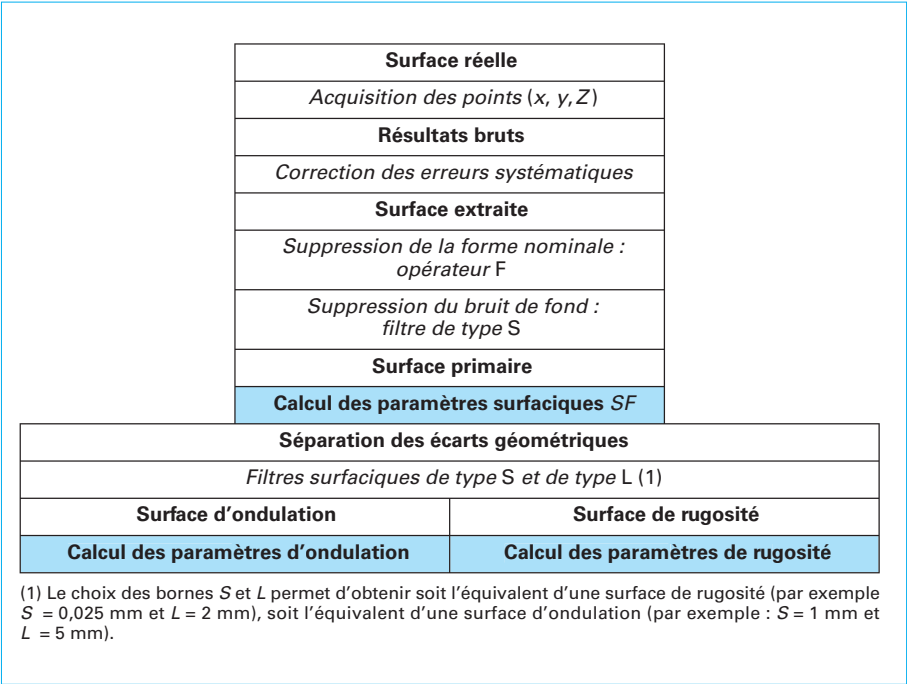


Figure 4 – Traitement de la séparation des
écarts géométriques

● **Surface primaire** : surface résultant de l'application d'un modèle mathématique à la surface réelle.

● **Filtre de type S** : élimine les composants de faible échelle de la surface réelle, permet d'obtenir la surface primaire. Il peut être utilisé pour réduire le bruit de fond et/ou obtenir une surface d'ondulation.

● **Filtre de type L** : sépare les composants de faible échelle des composants de grande échelle, à partir de la surface primaire. Il peut être utilisé pour obtenir une surface de rugosité et/ou pour supprimer les écarts de forme.

● **Filtre de type F** : élimine la forme de la surface extraite ou primaire.

● **Surface SF** : surface issue de la surface extraite ou primaire de laquelle ont été supprimés les composants de faible échelle par l'utilisation d'un filtre S ainsi que la forme nominale à l'aide d'un opérateur F .

● **Surface SL** : surface issue d'une surface SF de laquelle ont été supprimés les composants de grandes échelles par l'utilisation d'un filtre L .

● **Aire de base** : portion de surface utilisée pour la détermination des paramètres caractérisant la surface.

● **Aire d'évaluation** : ensemble des aires de base utilisées pour établir la surface à évaluer.

4.2.2 Définition des paramètres surfaciques

À ce jour, les paramètres 3D ne sont pas normalisés. Les paramètres présentés dans le tableau 12 sont issus de la norme expérimentale française XP E 05-030-1.

4.3 Méthodes de mesure

Différentes techniques permettent d'obtenir une image en trois dimensions de l'état d'une surface. Elles font appel à des principes physiques (variation de capacités, diffusion d'ultrasons), optiques (interférométrie, diffraction) ou mécaniques (palpage). Les méthodes les plus couramment employées (figure 5) pour la quantification de l'état de surfaces, utilisent des systèmes de mesure optiques ou à contact mécanique.

4.3.1 Méthode de mesure à contact mécanique

La méthode consiste à explorer la surface au moyen d'une série de palpées parallèles suivant des lignes régulièrement espacées. Ceci suppose que soit l'échantillon, soit le palpeur puisse se déplacer dans les trois directions de l'espace et qu'un système permette de caler avec précision les profils les uns par rapport aux autres.

La solution la plus répandue est l'utilisation d'un rugosimètre, tel que présenté dans le paragraphe 2, (coordonnées x et Z), auquel est ajouté un système mécanique de déplacement, constitué en général par un table micrométrique générant le déplacement de l'échantillon (coordonnées y). Un système électronique commande les déplacements et recueille les données sous forme discrétisée.

À partir de ces données, on peut :

- calculer les différents critères de rugosité et d'ondulation après filtrage ;
- visualiser le relief de plusieurs façons :
 - visualisation en perspective utilisant directement les profils enregistrés (lignes ou maillage),
 - projection soit avec des courbes de niveaux, soit avec des fausses couleurs,
 - image de synthèse lissée simulant une photographie de la surface.

Les techniques actuelles montrent que la topographie est appréhendée uniquement à l'aide de plusieurs relevés profilométriques effectués dans des directions choisies de la surface. Cette méthode de mesure devient très incomplète lorsque la surface est anisotrope, puisque par définition, la topographie de celle-ci devient dépendante de la direction de mesure.

4.3.2 Principales méthodes de mesure optiques

4.3.2.1 Profilométrie laser (coaxial ou par triangulation)

Ces méthodes sont très proches de la méthode par contact, à savoir qu'elles nécessitent l'exploration de la surface au moyen d'une série de trajectoires parallèles régulièrement espacées par déplacement de l'échantillon ou de la source. Les coordonnées Z sont acquises à l'aide d'un capteur optique à source laser. La méthode peut être coaxiale ou basée sur le principe de la triangulation suivant que le faisceau émis et le faisceau réfléchi suivent le même trajet ou une trajectoire différente (figure 6).

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

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

4.3.2.2 Microscopie interférométrique

La lumière d'une source est divisée à l'aide d'un miroir séparateur, une partie du faisceau est dirigé sur la pièce, l'autre sur un miroir de référence (figure 7). Après réflexion, les deux faisceaux sont de nouveau superposés au niveau du miroir séparateur.

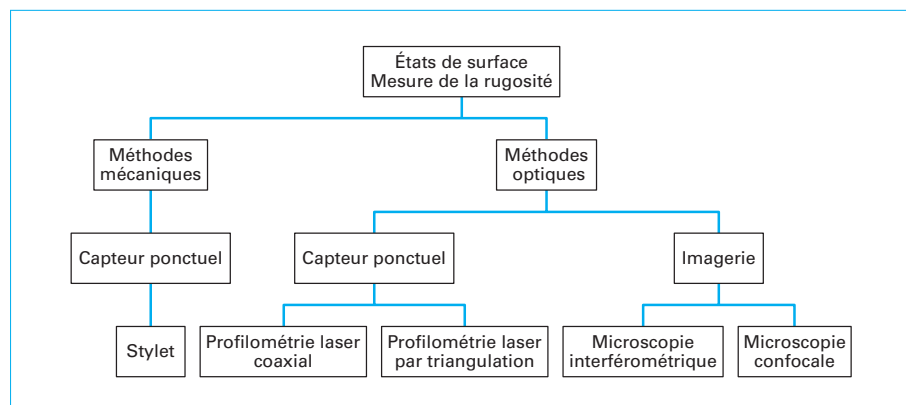


Figure 5 – Principales méthodes de mesure

Tableau 12 – Paramètres d'états de surface surfacique

Intitulé	Définition	Symbole
Paramètres de hauteur		
Écart moyen arithmétique	Moyenne arithmétique des hauteurs $Z(x, y)$, à l'intérieur de l'aire de base.	Sa
Écart moyen quadratique	Moyenne quadratique des valeurs des hauteurs $Z(x, y)$, à l'intérieur de l'aire de base.	Sq
Facteur d'asymétrie	Quotient de la moyenne des cubes des valeurs des hauteurs $Z(x, y)$ par le cube de la valeur du paramètre Sq , à l'intérieur de l'aire de base $Z(x, y)$.	Ssk
Facteur d'aplatissement	Quotient de la moyenne des valeurs à la puissance 4 des hauteurs $Z(x, y)$ par la valeur à la puissance 4 du paramètre Sq , à l'intérieur de l'aire de base.	Sku
Hauteur maximale de pic	Plus grande des hauteurs de pic, à l'intérieur d'une aire de base.	Sp
Hauteur maximale de creux	Plus grande des profondeurs de creux, à l'intérieur d'une aire de base.	Sv
Amplitude maximale de la surface	Somme de la hauteur maximale de pic et de la profondeur maximale de creux, à l'intérieur d'une aire de base.	Sz
Paramètres latéraux		
Densité de pics	Nombre de pics par unité d'aire.	Sds
Longueur d'autocorrélation	Longueur d'autocorrélation qui correspond à la plus forte décroissance de la fonction d'autocorrélation.	Sal
Ratio d'aspect de texture	Rapport entre la longueur minimale d'autocorrélation et la longueur maximale d'autocorrélation.	Str
Paramètres hybrides		
Courbure moyenne arithmétique des pics	Moyenne arithmétique de la courbure de la surface au voisinage des pics, à l'intérieur d'une aire de base.	Ssc
Courbure moyenne quadratique de la surface	Moyenne quadratique des pentes locales de la surface, à l'intérieur d'une aire de base.	Sdq
Ratio de la surface développée	Rapport entre l'aire développée à l'intérieur d'une aire de base et l'aire de base.	Sdr
Fonctions et paramètres associés		
Taux de surface portante	Rapport entre la surface portante à un niveau de coupe donné c et l'aire d'évaluation, c étant mesuré à partir du plan de référence.	$Smr(c)$
Hauteur du taux de surface portante	Niveau de coupe auquel le taux de surface portante Smr est obtenu.	$c(Smr)$
Paramètres linéaires de surface portante	Paramètres définis selon la norme NF EN ISO 13565-2 et calculés à partir de la fonction de surface portante.	$Sk, Spk, Svk, SMr1, SMr2$
	Fonction de surface portante : fonction représentant les taux de surface portante en fonction des niveaux de coupe c correspondants.	
Volume de vide	Volume compris entre un plan correspondant à un niveau de coupe $c(Smr)$ et la partie de la surface située au-dessous du plan de coupe.	$Vv(Smr)$
Volume de vide des creux	Volume de vide à un taux de surface portante de 80 %.	Vvv
Volume de vide du noyau	Différence de volume de vide entre les taux de surface portante de 10 % et de 80 %.	Vvc
Volume de matière	Volume compris entre un plan correspondant à un niveau de coupe $c(Smr)$ et la partie de la surface SL située au-dessus du plan de coupe.	$Vm(Smr)$
Volume de matière des pics	Volume de matière à un taux de surface portante de 10 %.	Vmp
Volume de matière du noyau	Différence de volume de matière entre les taux de surface portante de 10 % et 80 %.	Vmc
Autres paramètres		
Dimension fractale	Dimension fractionnaire caractérisant la géométrie de la surface calculée à partir de la pente du graphe d'échelle. Grappe d'échelle : graphe logarithmique des volumes compris entre les enveloppes morphologiques obtenues par fermeture et ouverture de la surface à l'aide d'un élément structurant plat, en fonction du logarithme de la taille s de cet élément structurant.	Sfd
Direction de texture de la surface SL	Angle, mesuré à partir de l'axe y , correspondant à la valeur maximale du spectre angulaire $APS(s)$.	Std

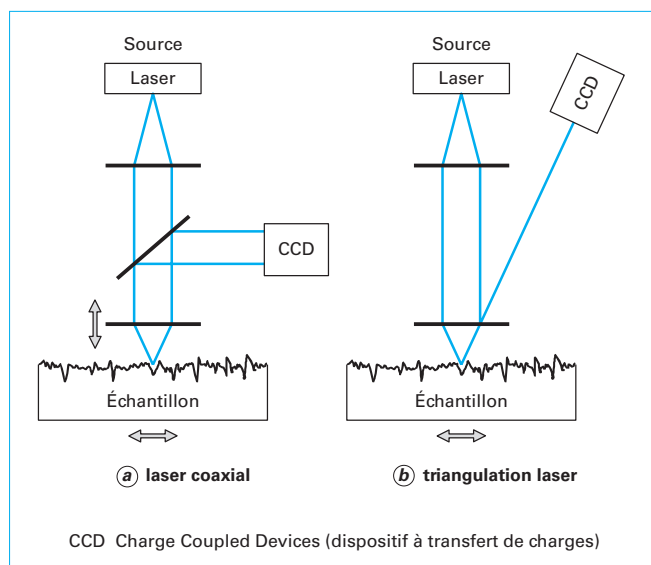


Figure 6 – Méthodes par profilométrie laser

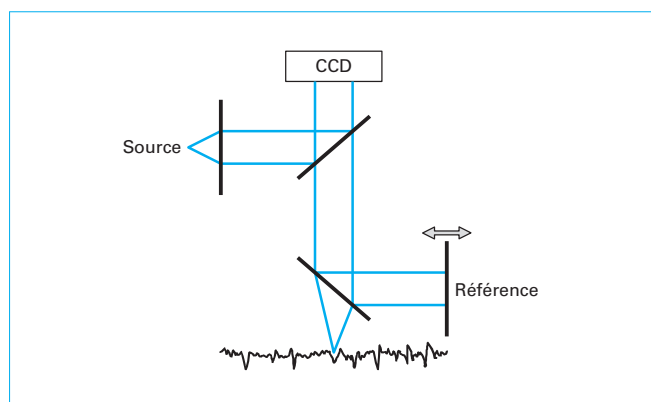


Figure 7 – Microscopie interférométrique

Des franges d'interférence sont générées par la différence de chemin optique entre les deux faisceaux. Le réseau de franges est enregistré avec une caméra CCD. En faisant varier par un déplacement du miroir ou de l'échantillon et en mesurant l'intensité réfléchi au cours du décalage, on accède à la hauteur relative de chaque point de la surface.

Une frange correspond à une ligne d'égale distance entre les deux surfaces. D'une frange à l'autre, cette distance varie de $\lambda/2$.

Il est ainsi possible de calculer des hauteurs pour chaque point de la caméra et de reconstruire de proche en proche la forme de la surface mesurée.

4.3.2.3 Microscopie confocale

La surface de l'échantillon est balayée par un laser. Grâce à un diaphragme placé avant le détecteur, celui-ci ne reçoit que le faisceau provenant du point focal (figure 8). En déplaçant l'échantillon ou le détecteur suivant l'axe vertical, le plan focal occupe alors différentes hauteurs ; on obtient ainsi une série de « coupes optiques » de la surface de l'échantillon.

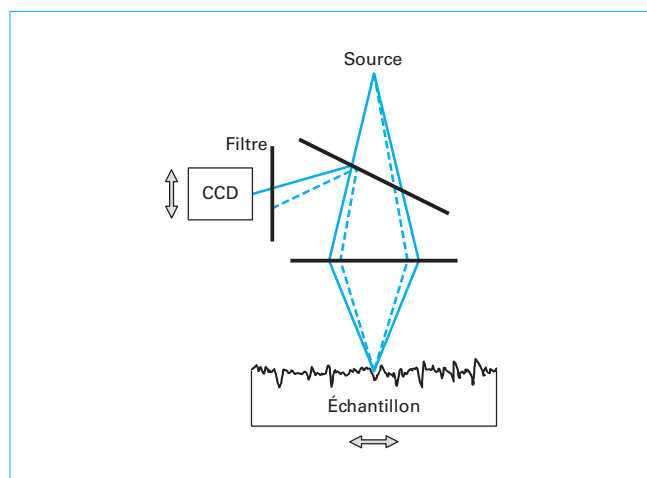


Figure 8 – Microscopie confocale

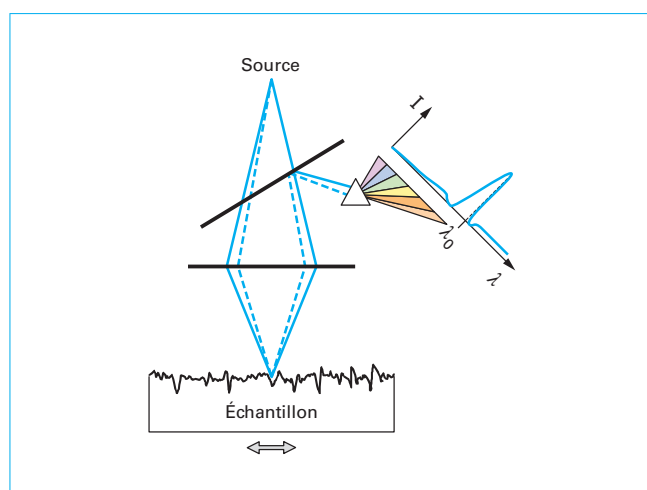


Figure 9 – Microscopie confocale avec codage chromatique

Une méthode dérivée de la microscopie confocale utilise l'aberration chromatique d'une lentille (figure 9). Une source blanche est focalisée sur la surface par un ensemble optique présentant une forte aberration chromatique. Le capteur est basé sur le principe du codage chromatique, où l'on attribue à chaque point du champ de mesure une longueur d'onde. L'altitude de la surface est déterminée par une analyse spectrale de la lumière réfléchie par cette surface. Cette méthode est plus rapide tout en ayant une profondeur de champ importante (jusqu'à 10 mm).

4.3.3 Choix de la méthode

Le choix dépend essentiellement de l'accessibilité des surfaces à caractériser, de leur nature, de la précision recherchée et des caractéristiques des équipements (tableau 13). Il s'agit dans un premier temps de choisir entre une méthode avec ou sans contact. Le tableau 14 donne des informations sur les possibilités et les limites de chaque méthode.

Tableau 13 – Caractéristiques des différentes méthodes

Méthode	Résolution verticale (μm)	Gamme de mesure verticale (mm)	Taille des surfaces
Méthode à contact			
Stylét	0,003 à 0,006	1 à 6	5 mm ² à 25 cm ²
Méthode optique			
Profilométrie laser coaxial	0,015	1,5	5 mm ² à 100 cm ²
Profilométrie laser par triangulation	0,5	3 à 12	jusqu'à 1 m ²
Microscopie interférométrique	0,000 1 à 0,005	< 0,1	0,1 à 100 mm ²
Microscopie confocale	0,005 à 0,020	0,1 à 1	Jusqu'à 400 cm ²

Tableau 14 – Possibilités et limites des méthodes

Méthode	Points forts	Limites d'utilisation	Domaine d'application
Mécanique à contact	<ul style="list-style-type: none"> Méthode normalisée (pour le 2D) Peu sensible à l'environnement Inspection de zones larges Gamme de mesure verticale importante Palpage de surface inclinée (jusqu'à 45°) Robustesse Fiabilité 	<ul style="list-style-type: none"> Ne convient aux surfaces de formes complexes Pouvoir d'inspection limité par la taille du palpeur Contact mécanique pouvant entraîner une déformation ou une détérioration de la surface Faible vitesse d'acquisition entraînant un temps d'acquisition très long (environ 30 min pour une surface de 2,5 mm par 2,5 mm) Difficultés d'avoir des déplacements précis dans le plan XY Sensible aux vibrations 	<ul style="list-style-type: none"> Pièces de forme assez régulière Pièces non déformables
Optique en général	<ul style="list-style-type: none"> Pas d'endommagement de la surface Mesures rapides (environ 5 min pour une surface de 2,5 mm × 2,5 mm) 	<ul style="list-style-type: none"> Méthodes non normalisées à ce jour (projets de norme en cours de préparation) Perte du signal en cas de pentes locales importantes Perturbation de la mesure (éblouissement ou manque de résolution) occasionnée par la brillance, le changement de couleur ou la non-réflexion de la surface Sensible aux changements de température Sensible aux vibrations 	<ul style="list-style-type: none"> Pièces fragiles Pièces déformables
Optique Profilométrie Laser coaxial	<ul style="list-style-type: none"> Convient aux échantillons spéculaires, diffusants, transparents et poreux Moins tributaire de la nature du matériau que les méthodes par triangulation Dynamique horizontale supérieure aux techniques microscopiques (de l'ordre de 200 mm) Pas de risque de zone d'ombre 	<ul style="list-style-type: none"> Ne convient pas aux échantillons absorbants ou fortement courbés Précautions liées à l'utilisation du laser 	Méthode souvent utilisée pour les mesures de planéité
Optique Profilométrie Triangulation laser	<ul style="list-style-type: none"> Dynamique horizontale supérieure aux techniques microscopiques (de l'ordre de 200 mm) Dynamique verticale supérieure au laser coaxial 	<ul style="list-style-type: none"> Précautions liées à l'utilisation du laser Ne convient pas aux échantillons spéculaires, transparents, absorbants, fortement courbés ou poreux Risque de zone d'ombre 	Surface de taille importante

Tableau 14 – Possibilités et limites des méthodes (suite et fin)

Méthode	Points forts	Limites d'utilisation	Domaine d'application
Optique Microscopie interférométrique	<ul style="list-style-type: none"> • Méthode adaptée pour rugosité très fine • Très haute résolution • Résolution verticale meilleure que les autres méthodes optiques • Convient aux échantillons absorbants, fortement courbés, spéculaires, transparents 	<ul style="list-style-type: none"> • Ne convient qu'aux surfaces réfléchissantes • Mesures intérieures impossibles • Variation entre 2 points consécutifs inférieur à une demi-longueur d'onde • Peu adapté aux matériaux métalliques • Faible dynamique verticale (limitée à quelques longueurs d'onde) • Très faible surface inspectée (de l'ordre du mm²) • Inclinaison de la surface de 0,5 à 20 degrés suivant la taille de la surface • Très sensible aux poussières et aux vibrations 	Surfaces de petite taille : <ul style="list-style-type: none"> – usinées : prothèse de hanches, roulement à bille, etc. ; – optiques : lentilles, etc. ; – déformables : polymères, vernis, etc.
Optique Microscopie confocale	<ul style="list-style-type: none"> • Moins tributaire de la nature du matériau que les méthodes par triangulation • Peu sensible à l'éclairage ambiant • Résolution verticale élevée • Convient aux échantillons poreux, courbés, spéculaires ou transparents 	<ul style="list-style-type: none"> • Le temps d'acquisition est long • Angle entre axe de mesure et normal à la surface inférieur à 35 degrés • Ne convient pas aux échantillons de faible réceptivité ou absorbants • Faible surface inspectée (de l'ordre de quelques mm²) • Très sensible aux vibrations 	Tous types de surfaces planes ou faiblement déformées, de petite taille

4.3.4 Méthode par projection de franges

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

Cette méthode est plus utilisée pour caractériser une surface qu'un état de surface. En effet, sa résolution verticale importante (de 2 à 10 µm) ne permet de caractériser que des surfaces très rugueuses.

États de surface

par **Bernard RAPHET**

Responsable Qualité et responsable Formation d'ANNECY MÉTROLOGIE
Ancien responsable du service métrologie du CTDEC
(Centre technique de l'industrie du décolletage)

Bibliographie

CNOMO. – *Guide de capitalisation pour la caractérisation et la mesure des états de surface en complément de la normalisation ISO.* GE40-084N, nov. 2000.
<http://www.cnomo.com>

Dr BLUNT (L.). – *Surfstand – The development of a basis for 3D surface texture standards.*

ZANI (M.-L.). – *Les techniques de contrôle d'aspect des surfaces.* Revue « MESURES » n° 741, page 60, janv. 2002.

ZANI (M.-L.). – *La mesure de rugosité ? Quelques normes.... Et des dizaines de paramètres.* Revue « MESURES » n° 758, page 59, oct. 2003.

La rugosité de surface des produits en acier : comment la caractériser. OTUA Office Technique pour l'Utilisation de l'Acier – Le courrier technique n° 63.

Recueil de conférences. – *Les nouvelles normes ISO des états de surface.* Journée technique organisée par le CETIM le 07 décembre 2000 à Saint-Étienne.

Normalisation

Association française de normalisation AFNOR

<http://www.afnor.fr>

1. Normes internationales

NF EN ISO 1302	04-02	Spécification géométrique des produits (GPS) – Indication des états de surface dans la documentation technique de produits.
NF EN ISO 3274	03-98	Spécification géométrique des produits (GPS) – État de surface : méthode du profil – Caractéristiques nominales des appareils à contact (palpeur).
NF EN ISO 4287	12-98	Spécification géométrique des produits (GPS) – État de surface : méthode du profil – Termes, définitions et paramètres d'état de surface.
NF EN ISO 4288	03-98	Spécification géométrique des produits (GPS) – État de surface : méthode du profil – Règles et procédures pour l'évaluation de l'état de surface.
NF EN ISO 5436-1	08-00	Spécification géométrique des produits (GPS) – État de surface : méthode du profil : étalons – Partie 1 : mesures matérialisées.
NF EN ISO 5436-2	03-02	Spécification géométrique des produits (GPS) – État de surface : méthode du profil – Étalons – Partie 2 : étalons logiciels.
NF EN ISO 8785	12-99	Spécification géométrique des produits (GPS) – Imperfections de surface – Termes, définitions et paramètres.
NF EN ISO 11562	03-98	Spécification géométrique des produits (GPS) – État de surface : méthode du profil – Caractéristiques métrologiques des filtres à phase correcte.
NF EN ISO 12085	03-98	Spécification géométrique des produits (GPS) – État de surface : méthode du profil – Paramètres liés aux motifs.

NF EN ISO 12179 05-00

Spécification géométrique des produits (GPS) – État de surface : méthode du profil – Étalonnage des instruments à contact (palpeur).

NF EN ISO 13565-1 03-98

Spécification géométrique des produits (GPS) – État de surface : méthode du profil – Surfaces ayant des propriétés fonctionnelles différentes suivant les niveaux – Partie 1 : filtrage et conditions générales de mesurage.

NF EN ISO 13565-2 03-98

Spécification géométrique des produits (GPS) – État de surface : méthode du profil – Surfaces ayant des propriétés fonctionnelles différentes suivant les niveaux – Partie 2 : caractérisation des hauteurs par la courbe de taux de longueur portante.

NF EN ISO 13565-3 02-02

Spécification géométrique des produits (GPS) – État de surface : méthode du profil – Surfaces ayant des propriétés fonctionnelles différentes suivant les niveaux – Partie 3 : caractérisation des hauteurs par la courbe de probabilité de matière.

2. Normes françaises

XP E05-030-1 12-03

Spécification géométrique des produits (GPS) – État de surface : surfacique – Partie 1 : termes et définitions et paramètres surfaciques.

XP E05-030-5 12-03

Spécification géométrique des produits (GPS) – État de surface : surfacique – Partie 5 : caractéristiques métrologiques des instruments à contact (systèmes de palpation).

XP E05-030-6 12-03

Spécification géométrique des produits (GPS) – État de surface : surfacique – Partie 6 : étalonnage et étalons des instruments à contact (systèmes de palpation).

NF E05-059-1 10-03

Spécification géométrique des produits (GPS) – Essais de réception et de vérification périodique des instruments de mesure de profil – Partie 1 : instruments de mesure des états de surface à contact.

Constructeurs et fournisseurs

(Listes non exhaustives)

Méthodes avec contact

Cotec <http://www.cotec.fr>
Digital Surf <http://www.digitalsurf.fr>
Hommelwerke <http://www.hommelwerke.com>
Mahr <http://www.mahr.com>
Mitutoyo <http://www.mitutoyo.fr>
Taylor-Hobson <http://www.taylor-hobson.com>
Veeco Instruments <http://www.veeco-europe.com>

Méthodes optiques

Breuckmann (Eotech) <http://www.eotech.fr>
Cotec <http://www.cotec.fr>

Digital Surf <http://www.digitalsurf.fr>
Fisba Optik (Eotech) <http://www.eotech.fr>
Fogale Nanotech <http://www.fogale.fr>
Hommel-Somicronic <http://www.hommelwerke.com>
Leica Microsystems <http://www.leica-microsystemes.com>
Micromap (Eotech) <http://www.eotech.fr>
Nanofocus (Eotech) <http://www.eotech.fr>
OME (Eotech) <http://www.eotech.fr>
Stil <http://www.stilsa.com>
Veeco Instruments <http://www.veeco-europe.com>
Zygo (Lot-Oriel) <http://www.lot-oriel.fr>

GAGNEZ DU TEMPS ET SÉCURISEZ VOS PROJETS EN UTILISANT UNE SOURCE ACTUALISÉE ET FIABLE

Techniques de l'Ingénieur propose la plus importante collection documentaire technique et scientifique en français !

Grâce à vos droits d'accès, retrouvez l'ensemble des **articles et fiches pratiques de votre offre**, **leurs compléments et mises à jour**, et bénéficiez des **services inclus**.



RÉDIGÉE ET VALIDÉE
PAR DES EXPERTS



MISE À JOUR
PERMANENTE



100 % COMPATIBLE
SUR TOUS SUPPORTS
NUMÉRIQUES



SERVICES INCLUS
DANS CHAQUE OFFRE

- + de 350 000 utilisateurs
- + de 10 000 articles de référence
- + de 80 offres
- 15 domaines d'expertise

- ☐ Automatique - Robotique
- ☐ Biomédical - Pharma
- ☐ Construction et travaux publics
- ☐ Électronique - Photonique
- ☐ Énergies
- ☐ Environnement - Sécurité
- ☐ Génie industriel
- ☐ Ingénierie des transports
- ☐ Innovation
- ☐ Matériaux
- ☐ Mécanique
- ☐ Mesures - Analyses
- ☐ Procédés chimie - Bio - Agro
- ☐ Sciences fondamentales
- ☐ Technologies de l'information

**Pour des offres toujours plus adaptées à votre métier,
découvrez les offres dédiées à votre secteur d'activité**

Depuis plus de 70 ans, Techniques de l'Ingénieur est la source d'informations de référence des bureaux d'études, de la R&D et de l'innovation.

www.techniques-ingenieur.fr

CONTACT : Tél. : + 33 (0)1 53 35 20 20 - Fax : +33 (0)1 53 26 79 18 - E-mail : infos.clients@teching.com

LES AVANTAGES ET SERVICES compris dans les offres Techniques de l'Ingénieur

ACCÈS



Accès illimité aux articles en HTML

Enrichis et mis à jour pendant toute la durée de la souscription



Téléchargement des articles au format PDF

Pour un usage en toute liberté



Consultation sur tous les supports numériques

Des contenus optimisés pour ordinateurs, tablettes et mobiles

SERVICES ET OUTILS PRATIQUES



Questions aux experts*

Les meilleurs experts techniques et scientifiques vous répondent



Articles Découverte

La possibilité de consulter des articles en dehors de votre offre



Dictionnaire technique multilingue

45 000 termes en français, anglais, espagnol et allemand



Archives

Technologies anciennes et versions antérieures des articles



Impression à la demande

Commandez les éditions papier de vos ressources documentaires



Alertes actualisations

Recevez par email toutes les nouveautés de vos ressources documentaires

*Questions aux experts est un service réservé aux entreprises, non proposé dans les offres écoles, universités ou pour tout autre organisme de formation.

ILS NOUS FONT CONFIANCE



www.techniques-ingenieur.fr

CONTACT : Tél. : + 33 (0)1 53 35 20 20 - Fax : +33 (0)1 53 26 79 18 - E-mail : infos.clients@teching.com