

Métrologie des surfaces

par **Patrick BOUCHARÉINE**

Ancien élève de l'École normale supérieure

Professeur à l'École supérieure d'optique et à l'Université Paris-Sud

1. États de surface et écarts de forme	R 1 390 - 2
2. Fréquences spatiales à deux dimensions.....	— 3
3. Écarts de forme	— 4
3.1 Contrôles de circularité	— 4
3.2 Contrôles de rectitude.....	— 4
3.2.1 Généralités	— 4
3.2.2 Méthode optique par lunette autocollimatrice.....	— 5
3.2.3 Mesure de rectitude par interférométrie laser	— 5
3.2.4 Fonction de transfert d'un palpeur en deux points	— 6
3.2.5 Planéité et rectitude.....	— 6
3.3 Contrôles de surfaces optiques par la lumière	— 7
3.4 Contrôle de surfaces optiques par interférométrie.....	— 7
3.5 Contrôle des plans optiques par l'interféromètre de Fizeau	— 8
3.5.1 Généralités	— 8
3.5.2 Mesures de rectitude et de planéité indépendantes de la référence	— 9
4. Contrôle des défauts de courtes périodes spatiales. Profilométrie par faisceau laser	— 10
5. Rugosité.....	— 11
5.1 Paramètres de rugosité.....	— 11
5.2 Méthodes mécaniques par palpeur	— 11
5.2.1 Généralités	— 11
5.2.2 Filtrage lié au palpeur mécanique.....	— 11
5.3 Étalonnage des palpeurs pour la mesure des rugosités	— 12
5.4 Méthodes optiques.....	— 13
5.4.1 Généralités	— 13
5.4.2 Palpeurs optiques différentiels.....	— 14
6. Au-delà de la rugosité, les nouvelles microscopies, sondes de surface.....	— 14
7. Conclusion	— 15
Pour en savoir plus	Doc. R 1 390

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

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

Dans la plupart des normes qui traitent des surfaces, l'**examen visuel et tactile** est souvent le premier cité. Quoique qualitatif, il représente souvent une synthèse de paramètres difficilement quantifiables par d'autres moyens : texture, teinte, aspects en lumières diverses, sensations mécaniques et thermiques. Comme pour un médecin qui sait voir dans une radiographie ou un scanner les éléments qui lui permettront de déterminer son diagnostic, l'expérience seule permet à un ingénieur ou à un technicien de tirer des images directes ou indirectes mises à notre disposition par l'instrumentation moderne, les conclusions sur la conformité de la surface à un cahier des charges particulier.

Nous analyserons dans cet article diverses méthodes qui permettent de caractériser les surfaces par leurs propriétés géométriques macroscopiques (forme : rectitude, planéité ou circularité), et microscopiques (rugosité). Nous décrirons quelques instruments permettant d'accéder à ces propriétés et nous en citerons d'autres comme les microscopes en champ proche ou les microscopes à force atomique.

Nota : nous ne parlerons pas de toute une catégorie d'analyses physico-chimiques des surfaces que l'on trouvera décrites en particulier dans le volume « Analyse et Caractérisation » :

- Microscopie optique ;
- Microscopies électroniques ;
- Microscopie ionique à effet de champ ;
- Analyse par émission ionique secondaire (SIMS) ;
- Spectroscopie des électrons Auger ;
- Spectroscopie de photo électrons : XPS ou ESCA et UPS.

On trouvera ailleurs une description plus complète des microscopes à effet tunnel (Techniques de l'Ingénieur, [P 895]).

1. États de surface et écarts de forme

■ 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.

● À 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 qui ne prennent en compte que les défauts de courtes périodes spatiales, c'est-à-dire de grandes fréquences spatiales, et les écarts de forme qui ne prennent en compte que les défauts de grandes périodes spatiales, 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.

Rugosité et ondulation traduisent ce que l'on appelle l'**état de surface**.

■ Ces notions sont illustrées sur les **enregistrements** de la figure 1. Sur la figure 1a 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 1b. 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 1d est au contraire celui d'où l'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 1c 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.

Ces périodes et ces fréquences spatiales ont été choisies ici arbitrairement. 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. Nous faisons dans le paragraphe suivant quelques rappels sur ces notions, compliquées ici par le fait que nous sommes dans un monde à deux dimensions.

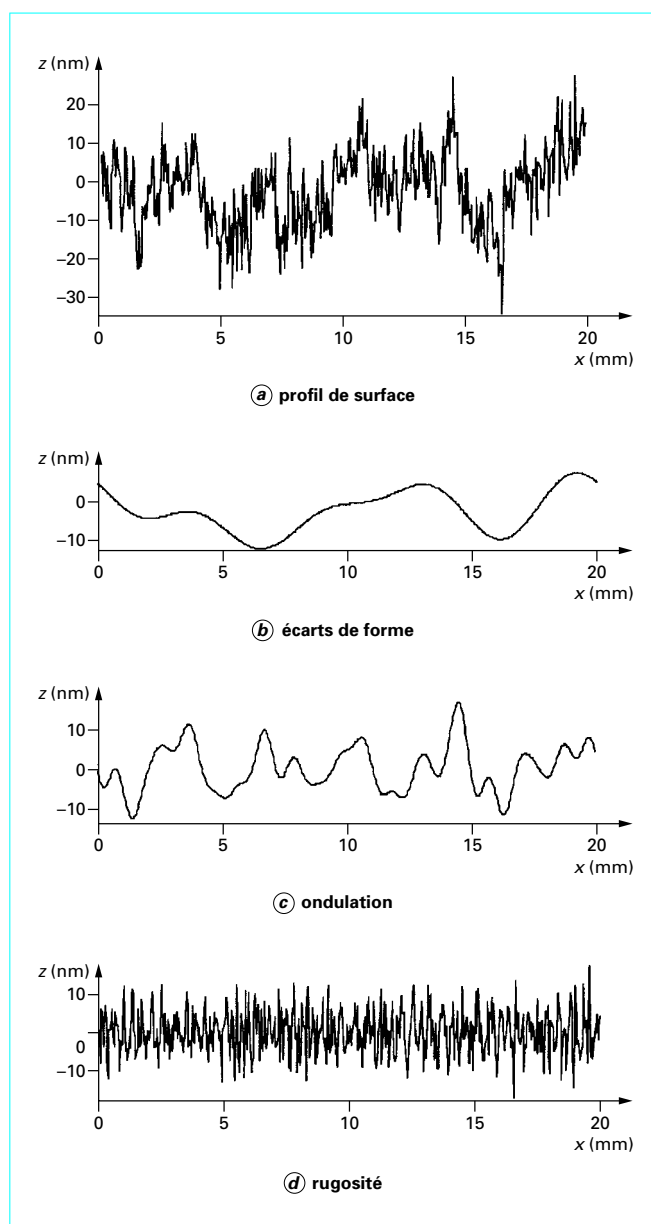


Figure 1 – Profil complet, écarts de forme, ondulation et rugosité d'une surface enregistrés sur une ligne

2. Fréquences spatiales 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 2). La

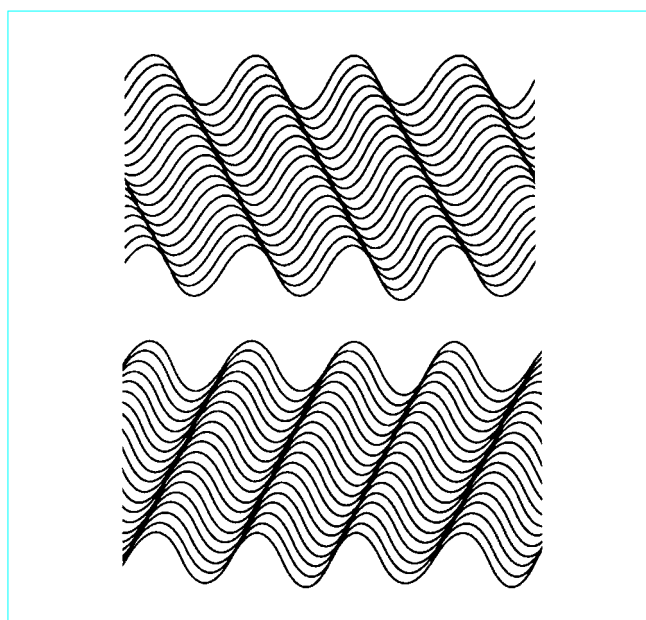


Figure 2 – Deux fréquences spatiales bidimensionnelles de même période et de directions différentes. Toute fonction des paramètres x et y peut se décomposer en une superposition de telles ondes qui est son spectre à deux dimensions

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'autocorrélation** 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'autocorrélation. Nous verrons (§ 5.4) une méthode d'analyse des états de surface par diffusion de la lumière qui, dans certaines conditions, donne directement la densité spectrale de puissance des rugosités dans un domaine bien défini 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 distinguées. Les exemples donnés sur la figure 1 sont obtenus par **filtrage numérique**, c'est-à-dire que les fonctions de transfert sont connues exactement (voir les valeurs données dans le paragraphe précédent). Les signaux enregistrés dans la pratique sont traités par des **filtres analogiques**, mécaniques ou électriques, dont les fonctions de transfert ne sont pas bien connues, voire n'existent pas si le processus de lecture n'est pas linéaire. C'est, bien plus que l'étalonnage des capteurs utilisés pour mesurer les très petits écarts $z(x, y)$, la raison essentielle des désaccords dans les comparaisons sur les états de surface et les écarts de forme.

Fonctions d'autocorrélation et transformations de Fourier à deux dimensions sont tout à fait analogues à ce que l'on connaît à une dimension. Lorsque la surface est isotrope, c'est-à-dire lorsque ses propriétés statistiques ne dépendent pas de la direction des fréquences spatiales, on peut ramener le problème à une dimension en analysant une ligne de la surface.

3. Écarts de forme

Deux types de formes sont essentiellement contrôlés en optique et en mécanique : les plans d'une part, les sphères et les cylindres de révolution ou tampons et bagues d'autre part. Ces formes donnent lieu à deux types de mesures : les mesures de rectitude et de planéité d'une part, les mesures de circularité d'autre part.

Les tampons et les bagues lisses utilisés comme références en mécanique donnent lieu à des mesures de circularité autour de leur axe et à des mesures de rectitude le long de leurs génératrices.

3.1 Contrôles de circularité

Les contrôles de circularité sont indispensables pour les pièces mécaniques à symétrie de révolution, en particulier pour les bagues et les tampons étalons, dont on ne mesure que quelques diamètres. La mesure de ces diamètres jointe à une étude des défauts de circularité donne une connaissance beaucoup plus complète de ces étalons.

Dans une mesure de circularité, on fait tourner la pièce ou un palpeur de grande sensibilité autour d'un de ses axes de révolution, et on vérifie avec le palpeur que la cote étudiée reste constante (figure 3). Les palpeurs ont une sensibilité de l'ordre de quelques dizaines de nanomètres, mais une dynamique généralement restreinte (quelques dizaines ou centaines de micromètres). Une des difficultés de ce type de contrôle est d'assurer la coaxialité de l'axe de rotation de la machine avec l'axe de révolution de la pièce. Une des limitations à l'exactitude de ce type de mesure est la qualité de la rotation de la machine de contrôle, laquelle peut être amenée à supporter des pièces de grandes dimensions et de forte masse (quelques centaines de millimètres de diamètre, plusieurs kilogrammes ou dizaines de kilogrammes). Les paliers à air ou à huile permettent d'excellentes performances. La stabilité de la rotation est vérifiée grâce à des sphères de référence dont les défauts de sphéricité peuvent descendre au-dessous de quelques centièmes de micromètre. La sphère est en effet la forme géométrique que l'on sait le mieux approcher par usinage.

Nota : au début de ce siècle les physiciens ont réalisé des prouesses pour mesurer le volume d'un cube de quartz afin de déterminer la masse du décimètre cube d'eau par la poussée d'Archimède. C'est maintenant sur des sphères de silicium que l'on espère améliorer la connaissance de la masse volumique de ce matériau pour en déduire la masse d'un atome de silicium, et donc améliorer la connaissance de la constante d'Avogadro.

C'est une sphère de silice qui permet de déceler les défauts de rotation des machines de contrôle. En faisant tourner la pièce par rapport à la machine, ce contrôle permet de corriger ces défauts, avec une précision limitée par la répétabilité de la mise en place de la pièce sur la machine et par les fluctuations des défauts de rotation de la machine. Ceux-ci se combineront au hasard avec les défauts de circularité des pièces étudiées, tantôt en s'y ajoutant, tantôt en s'en retranchant, ce qui se traduit en moyenne par une addition quadratique des défauts de circularité de la pièce étudiée et des défauts de rotation de la machine de contrôle.

Prenant en compte les défauts des machines, ceux des sphères étalons, et l'étalonnage des palpeurs, le contrôle des défauts de circularité des pièces mécaniques s'effectue avec des **incertitudes** de l'ordre de quelques dixièmes de micromètre sur des diamètres allant jusqu'à quelques centaines de millimètres.

Le résultat d'une mesure de circularité apparaît généralement sur un **enregistrement** graphique qui n'est pas toujours facile à interpréter (figure 4). En effet le rayon de la pièce est soustrait pour ne faire apparaître que les variations de rayon avec une sensibilité suffisante. Pour étalonner le capteur, on fait parfois usage d'un cylindre à méplat, qui engendre un défaut d'amplitude connue. Sur la figure 4 on voit ainsi l'enregistrement d'une pièce avec ses défauts (figure 4a) et celui d'un cylindre méplaté présentant un

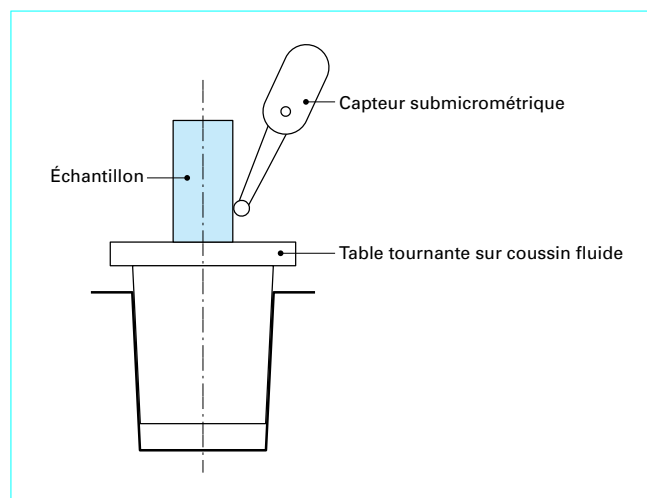


Figure 3 – Machine pour contrôle de circularité

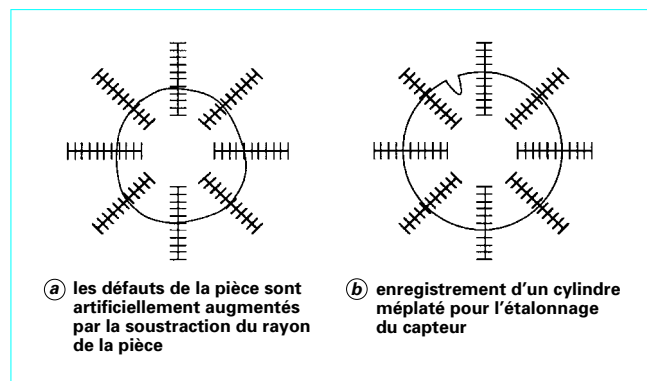


Figure 4 – Enregistrements sur une machine de contrôle des défauts de circularité

méplat de $0,25\ \mu\text{m}$. À cause de l'amplification d'échelle sur la mesure du défaut, l'allure du méplat n'a rien à voir avec son aspect réel (figure 4b). Sur les instruments actuels, l'enregistrement graphique est accompagné d'un traitement numérique des données qui permet de déterminer les cercles inscrits et exinscrits d'où seront extraits les paramètres caractérisant les écarts de circularité. Il est à noter que dans cette mesure, le filtrage des défauts de courte période spatiale comme les rayures ou les poussières pose les mêmes problèmes que pour distinguer la rugosité, les ondulations et les écarts de rectitude. C'est un filtrage exprimé ici en nombre d'ondulations par tour qui permettra de comparer différents contrôles de circularité.

3.2 Contrôles de rectitude

3.2.1 Généralités

Les défauts de rectitude sont également étudiés par palpeur avec une machine qui définit elle-même une translation rectiligne pour le palpeur. Mais ici nous allons voir que les défauts de la machine peuvent être déterminés et corrigés, et cela sans même qu'il soit nécessaire de disposer d'une référence de rectitude.

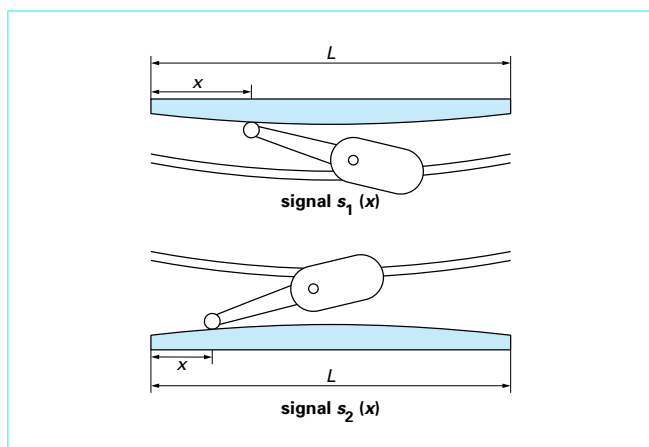


Figure 5 – Auto-étalonnage des défauts de rectitude d'une machine par retournement de la pièce étudiée

En effet supposons que la translation du palpeur sur la longueur L de la pièce à contrôler soit entachée d'un défaut $z_0(x)$ en fonction du déplacement de longueur x , x variant de 0 à L . La pièce est elle-même entachée d'un défaut de rectitude caractérisé par un écart $z_1(x)$.

- Le défaut mesuré par la machine sur la pièce sera la somme $z_0(x) + z_1(x)$ et sera enregistré sous la forme d'un signal $s_1(x)$.
- Si nous effectuons sur la même pièce la même mesure de rectitude après retournement du palpeur et de la pièce par rapport à la machine, sans toucher au dispositif de translation, on s'aperçoit que les défauts de la machine jouent en sens inverse, c'est-à-dire avec la même valeur mais avec le signe contraire, sur les défauts de la pièce (figure 5). On enregistre un deuxième signal $s_2(x)$ qui est cette fois la différence $z_0(x) - z_1(x)$.

De ces deux mesures on voit que l'on extrait, indépendamment de toute référence de rectitude, les valeurs du défaut $z_0(x)$ de la machine et du défaut $z_1(x)$ de la pièce étudiée :

$$z_0(x) = \frac{1}{2}(s_1(x) + s_2(x))$$

$$z_1(x) = \frac{1}{2}(s_1(x) - s_2(x))$$

Il restera comme **incertitude** sur l'évaluation du défaut de rectitude de la pièce l'incertitude due aux défauts de justesse du palpeur, aux incertitudes sur la mesure de x et aux défauts de répétabilité de la machine.

Toutefois, cette méthode ne permet pas de corriger la **flexion** de la pièce qui change de signe lorsque la pièce est retournée. Cette flexion sera minimisée par un support adapté à la longueur étudiée (support aux points d'Airy, symétriquement disposés à 0,577 de la longueur de la pièce) ou par une répartition uniforme de la force d'appui. Elle pourra éventuellement être corrigée par le calcul, si l'on connaît les paramètres mécaniques du matériau.

3.2.2 Méthode optique par lunette autocollimatrice

Une technique très puissante pour évaluer les défauts de rectitude d'un banc ou d'une glissière met en jeu une lunette autocollimatrice qui forme à l'infini l'image d'un objet ponctuel (croisée de fils) que l'on observe avec la même lunette par réflexion sur un miroir plan dont le support se déplace sur le banc ou la glissière (figure 6). Les **variations de pente locale** du banc ou de la glissière

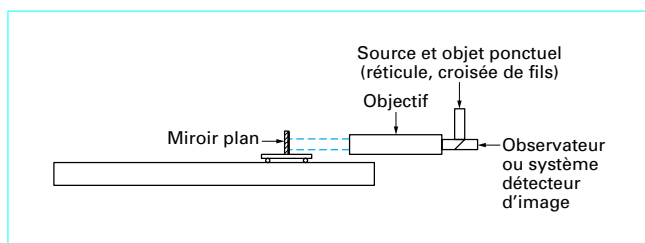


Figure 6 – Mesure de défauts de rectitude par lunette autocollimatrice

sont ainsi détectées avec une sensibilité qui ne dépend que du diamètre du faisceau et de la longueur d'onde de la lumière.

Des lunettes électroniques associées à des détecteurs à deux ou quatre quadrants, ou à des barrettes ou des matrices de photodiodes, atteignent des performances dix fois meilleures, si les conditions d'environnement le permettent. A cette précision de pointé, il faut en particulier se protéger des fluctuations liées à la turbulence atmosphérique. Le déplacement du support du miroir sur le banc ou la glissière permet de détecter les variations de pentes entre deux points distants de ℓ , distance entre les points d'appui du support.

C'est la diffraction de la lumière par l'objectif de la lunette (ou par le miroir si celui-ci ne couvre pas l'objectif) qui impose une **limite fondamentale** à la sensibilité de la mesure :

- un miroir rectangulaire de hauteur D uniformément éclairé par un faisceau lumineux de longueur d'onde moyenne λ donne une tache de diffraction dont la largeur angulaire à mi-hauteur est à peu près égale à λ/D ;

- un miroir de section circulaire de diamètre D , éclairé par un faisceau lumineux de longueur d'onde moyenne λ donne une tache de diffraction dont la largeur angulaire à mi-hauteur est à peu près égale à $1,22 \lambda/D$.

Ces largeurs sont la distance entre le maximum de la tache de diffraction et le premier zéro, c'est à peu près le diamètre de la tache lumineuse à la moitié de son intensité maximale. Un diamètre de 50 mm dans le jaune donne une largeur angulaire égale à $5 \cdot 10^{-5}$ rad, soit 10", que l'on peut pointer assez facilement au dixième de sa largeur (1") par pointé visuel, plus difficilement au centième de cette largeur avec une lunette équipée d'un détecteur d'image (barrette ou matrice de diodes).

3.2.3 Mesure de rectitude par interférométrie laser

Sur le même principe que la lunette autocollimatrice (§ 3.2.2), mais avec une sensibilité un peu meilleure, l'interférométrie à laser permet de mesurer le basculement d'un ensemble de deux coins de cube dont les sommets sont distants de D . C'est la variation de chemin optique entre les deux faisceaux que l'on mesure à quelques centièmes de micromètres près, ce qui conduit à une **incertitude** sur les variations de pente du marbre de l'ordre de quelques dixièmes de seconde d'angle (figure 7).

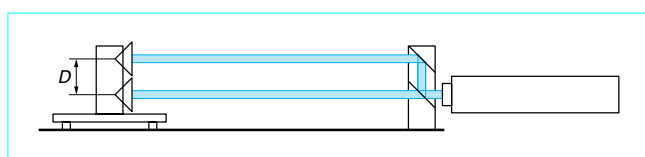


Figure 7 – Système interférométrique à laser pour le contrôle de rectitude

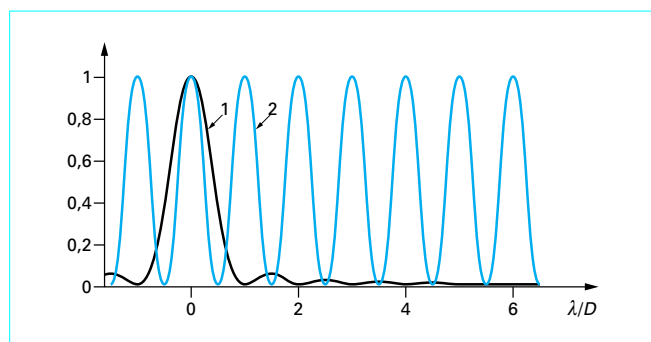


Figure 8 – Comparaison entre la tache de diffraction d'un miroir rectangulaire (1) et la fonction interférentielle d'un système laser à deux faisceaux (2), la distance D entre les faisceaux étant égale à la hauteur du miroir

La largeur de la tache de diffraction qui limitait la résolution angulaire d'une lunette autocollimatrice est ici remplacée par la fonction d'interférence entre les deux faisceaux. On peut voir sur la figure 8 que cette fonction sinusoidale est plus fine d'un facteur approximativement égal à 2. L'utilisation de deux faisceaux distants de D au lieu d'une pupille uniformément éclairée sur une hauteur D conduit à ce que l'on appelle de la **superrésolution angulaire**.

3.2.4 Fonction de transfert d'un palpeur en deux points

On peut définir la fonction de transfert d'un procédé de mesure qui échantillonne l'objet en deux points distants de ℓ en fonction de la période λ d'un défaut. Modélisons un tel défaut d'amplitude δz et de période λ par la fonction :

$$\delta z \sin 2\pi x / \lambda$$

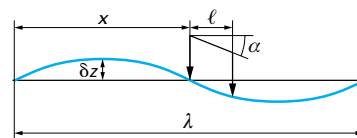
où x est l'abscisse depuis une origine arbitraire (figure 9). Le palpeur, qui prend appui en deux points distants de ℓ , fera un angle α (très petit) que l'on peut écrire :

$$\alpha \approx \tan \alpha = \frac{\delta z}{\ell} \left(\sin \frac{2\pi(x+\ell)}{\lambda} - \sin \frac{2\pi x}{\lambda} \right) = \frac{2\delta z}{\ell} \cos \frac{\pi(2x+\ell)}{\lambda} \sin \left(\frac{\pi\ell}{\lambda} \right)$$

L'amplitude est proportionnelle à $\delta z / \ell$, ce qui est assez intuitif. Le cosinus fonction de x varie entre +1 et -1 tant que λ est plus petit que la longueur L étudiée, mais l'amplitude est atténuée par $\sin(\pi\ell / \lambda)$.

La fonction de transfert s'annule pour toutes les périodes λ qui sont sous-multiples de ℓ , c'est-à-dire pour toutes les fréquences spatiales multiples de $1/\ell$. La bande passante est donc limitée par $1/\ell$ vers les hautes fréquences spatiales, et par $1/L$ vers les basses fréquences spatiales. La forme de la fonction de transfert en fonction de la fréquence spatiale $1/\lambda$ est une suite d'arcs de sinusoides. La fonction de transfert est négative pour toutes les fréquences spatiales qui font coïncider un minimum avec le centre du segment joignant les deux points du palpeur lorsque ces points sont sur des maxima du profil. Cette suite est atténuée vers les hautes fréquences spatiales par le rôle intégrateur des pieds du palpeur.

Le palpeur en deux points introduit donc une limitation à la fonction de transfert des fréquences spatiales. Un autre inconvénient de ce palpeur est qu'on ne mesure que la pente moyenne entre les deux points d'appui du support. Pour reconstituer le profil, il faut sommer les pentes mesurées sur toute la longueur L de l'échantillon, et l'incertitude sur l'altitude d'un point de l'échantillon situé à



δz est l'amplitude du défaut, λ sa période, α est l'angle détecté par une lunette autocollimatrice ou par un autre dispositif de mesure angulaire

Figure 9 – Fonction de transfert des défauts de forme pour un palpeur à deux points d'appuis distants de ℓ

la distance d par rapport au point origine augmente comme la racine carrée de d . Cette méthode présente en revanche l'avantage de ne pas nécessiter de référence. Sa précision n'est limitée que par la répétabilité des mesures.

3.2.5 Planéité et rectitude

Pour passer des défauts de rectitude aux défauts de planéité, il faut prendre quelques précautions. En effet, des surfaces non planes peuvent être réglées, c'est-à-dire contenir des droites. Si tous les diamètres d'un miroir sont parfaitement rectilignes, on peut craindre que ces diamètres ne se trouvent pas dans un même plan, sauf si la pièce est de révolution.

Pour passer de la mesure des écarts de rectitude à la mesure des écarts de planéité, il faut combiner plusieurs mesures de rectitude et les recouper convenablement, sans oublier que dans une mesure de rectitude, l'altitude du point de départ et celle du point d'arrivée sont arbitraires (figure 10).

Pour **contrôler la planéité d'un marbre**, plusieurs techniques s'appuient sur des mesures multiples de rectitudes.

On peut mesurer les défauts de rectitude sur les quatre côtés, les deux diagonales et les deux médianes suivant le schéma de ce que l'on appelle le drapeau britannique ou « l'Union Jack » (figure 11a). D'autres préfèrent tracer un quadrillage dont la maille est plus ou moins serrée (figure 11b). D'autres encore préfèrent une maille à 60° constituée par une série de triangles équilatéraux (figure 12). La mesure sera d'autant meilleure que les lignes sont nombreuses et se recoupent, introduisant une redondance dans l'information et la possibilité d'évaluer les erreurs de mesures par un résidu lorsque plusieurs évaluations sont possibles d'un défaut en un même point du marbre. Il ne faut pas oublier que, dans la mesure d'une rectitude, deux paramètres restent indéterminés qui sont la hauteur moyenne et la pente moyenne sur chaque ligne balayée.

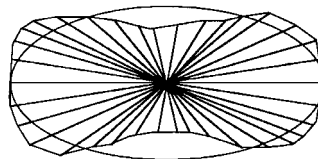


Figure 10 – Planéité et rectitude : exemple de surface non plane dont tous les diamètres sont rectilignes

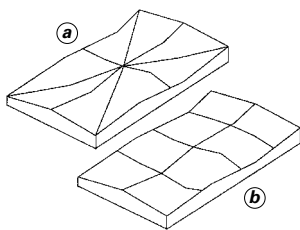


Figure 11 – Écarts de planéité d'un marbre à partir de mesures d'écarts de rectitude

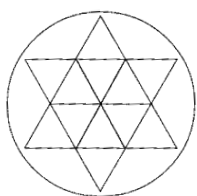


Figure 12 – Écarts de planéité d'un marbre ou d'un miroir par maillage triangulaire des écarts de rectitude

3.3 Contrôles de surfaces optiques par la lumière

L'optique est une discipline à la fois très exigeante sur la géométrie des surfaces, et bien pourvue en moyens très divers pour le contrôle de ces surfaces.

Le plus simple des contrôles est le **test de Foucault** sur une surface sphérique qui, sans donner la valeur de son rayon de courbure, détecte les écarts de forme par rapport à une sphère parfaite à l'aide d'un simple trou et d'un couteau. Un faisceau de lumière est concentré sur un trou dont le diamètre, inférieur à ce qui peut être résolu par le miroir, donne une surface d'onde incidente sphérique parfaite. On observe l'image de retour formée sur le point source après avoir dévié la lumière par une lame semi-réfléchissante, seul élément susceptible de détériorer les surfaces d'onde, mais qui est de faibles dimensions et de peu de conséquences sur le faisceau si on la place à proximité du point de focalisation.

Un **couteau** coupe latéralement le faisceau au voisinage de son point de focalisation : si le couteau est placé après le point de focalisation (sens de propagation de la lumière), on voit une ombre se déplacer dans le champ dans le sens inverse du déplacement du couteau (figure 13a) ; si le couteau est placé avant le point de focalisation, on observe une ombre qui se déplace dans le même sens que le couteau (figure 13c). Si le couteau est au point de focalisation et si le miroir est une sphère parfaite, on voit le champ s'éteindre uniformément (figure 13b). Les opticiens savent reconnaître les principaux défauts d'une surface sphérique aux aspects pris par le champ de lumière au voisinage de l'extinction. La figure 13d donne l'exemple d'une aberration sphérique correspondant à un rayon de courbure qui augmente sur les bords du miroir. Le couteau vient ici de la droite et se trouve avant le point de focalisation axial et après le point de focalisation du bord de champ.

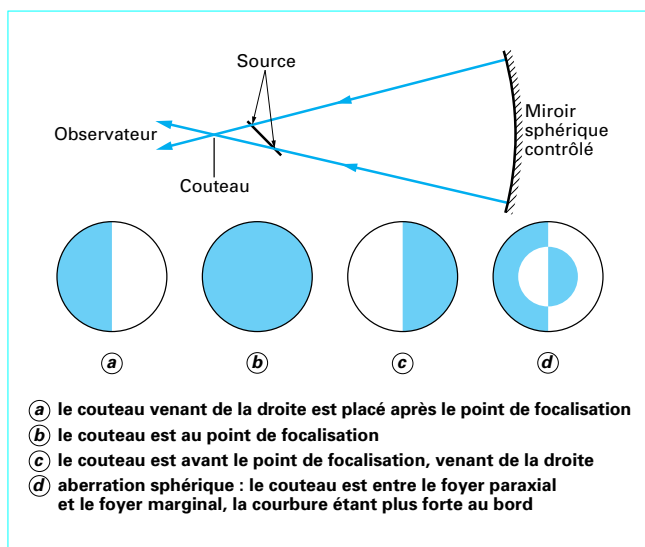


Figure 13 – Test de Foucault

3.4 Contrôle de surfaces optiques par interférométrie

L'interférométrie est un moyen puissant d'étude des surfaces optiques par comparaison à une surface de référence. L'interféromètre de Michelson a été modifié par Twyman et Green (figure 14) pour étudier les surfaces planes et sphériques avec une sensibilité égale à quelques fractions de longueurs d'onde (quelques centièmes à quelques dixièmes de micromètre). On trouvera une illustration très spectaculaire de ces techniques dans la référence bibliographique [1] où sont photographiés plusieurs systèmes de franges d'interférences donnés par les aberrations les plus classiques de l'optique : aberration sphérique, astigmatisme, coma.

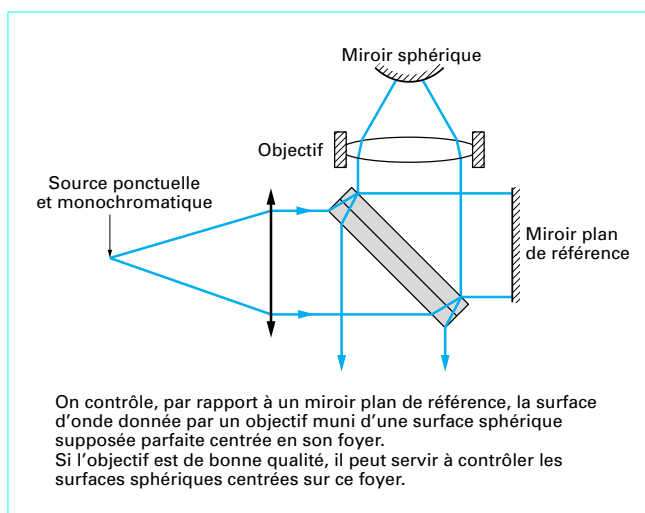


Figure 14 – Interféromètre de Twyman et Green pour contrôler la forme des surfaces d'onde

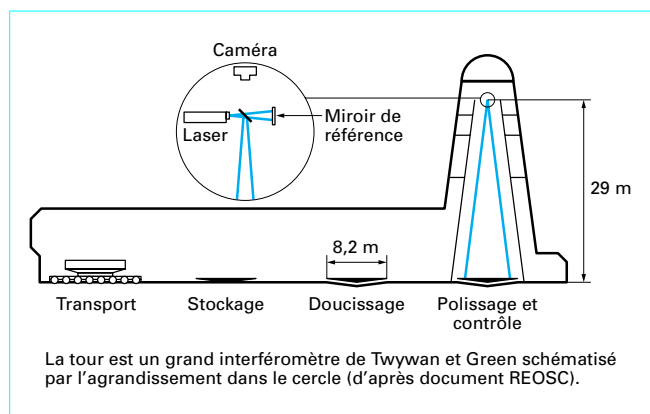


Figure 15 – Atelier de polissage et de contrôle des grands miroirs astronomiques

L'interférométrie s'applique depuis le contrôle visuel des touches planes de machines à mesurer à l'aide d'un verre plan jusqu'à celui des miroirs de 8 m de diamètre polis à Saint-Pierre-du-Perray par la Société REOSC pour le « *Very Large Telescope* » européen en cours de montage au Chili. La grande tour caractéristique de cet atelier d'optique n'est autre qu'un grand interféromètre de Twyman Green destiné à comparer la surface du grand miroir poli au niveau du sol à un petit miroir de référence situé au sommet de la tour avec la source et la lame séparatrice. Les trajets optiques se font par aller et retour sur toute la hauteur de la tour (29 m), doublée intérieurement d'une deuxième enceinte pour isolation thermique et isolation mécanique de l'ensemble du bâtiment. Un gradient thermique positif garantit l'absence de convection à l'intérieur de la tour. La surface des miroirs est ainsi contrôlée à mieux qu'un dixième de frange près (figure 15).

3.5 Contrôle des plans optiques par l'interféromètre de Fizeau

3.5.1 Généralités

Pour l'étude des surfaces planes, l'interféromètre de Fizeau (figure 16) est particulièrement bien adapté parce qu'il réduit considérablement l'influence des turbulences atmosphériques en mettant la surface de référence et la surface étudiée très proches l'une de l'autre. Nous décrivons le montage en activité depuis plusieurs dizaines d'années à l'Institut d'Optique qui, bien que fonctionnant toujours avec des prises de vues photographiques et dépouillement manuel des clichés, a été optimisé du point de vue interférométrique pour atteindre les meilleures exactitudes.

Deux plans en silice se font face, avec un intervalle entre les plans aussi faible que possible pour éviter toute instabilité et toute perturbation atmosphérique. L'intervalle de quelques dixièmes de millimètre est défini par des cales en papier taillées en biseau pour permettre un ajustement de la direction des franges et de leur espacement.

L'interféromètre est éclairé sous incidence normale par une lampe à vapeur de mercure en basse pression qui garantit la valeur de la longueur d'onde à quelques millièmes de nanomètre près. L'homogénéité de l'éclairement est optimisée grâce à un guide de lumière formé par un canon de verre de 5 mm de diamètre et 60 mm de longueur. Le tout éclaire un diaphragme de 2,5 mm de diamètre situé à 60 cm des plans.

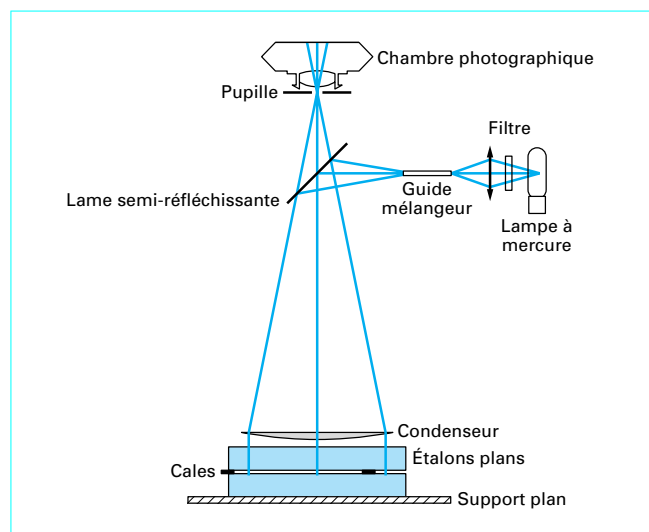


Figure 16 – Interféromètre de Fizeau pour le contrôle de rectitude des diamètres de plans optiques

(d'après document Institut d'Optique Théorique et Appliquée)

Sur les plans dont le diamètre peut aller jusqu'à 150 mm, on place un condenseur qui forme un faisceau de rayons parallèles et focalise la lumière réfléchie en autocollimation. Par reports d'un étalon de 150 mm, on peut observer les franges sur des plans dont le diamètre va jusqu'à 300 mm. Une lame semi-réfléchissante réfléchit la lumière incidente et transmet la lumière de retour dans un objectif photographique de 50 mm de distance focale. Cet objectif forme l'image des plans et des franges d'interférence qui y sont localisées sur une pellicule standard de 35 mm. Ces franges d'interférence donnent un éclaircissement fonction sinusoïdale de la différence de marche entre les rayons lumineux réfléchis par la face inférieure de la lame supérieure et par la face supérieure de la lame inférieure. Si e est l'épaisseur d'air entre les deux lames (quelques centièmes de millimètre), l'éclaircissement des franges s'écrit :

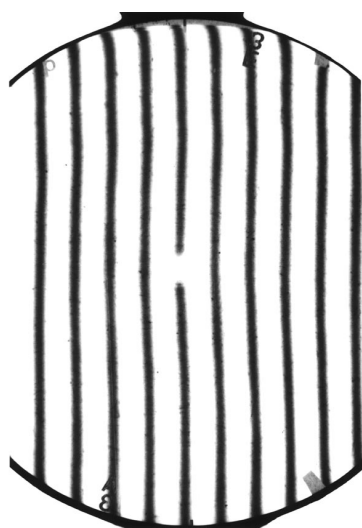
$$E = \frac{E_0}{2} \left(1 + \cos \frac{2\pi e}{\lambda} \right)$$

Le montage autocollimateur présente l'inconvénient de donner une tache de lumière parasite réfléchie au centre du champ par la face avant de la lentille de champ et empêche d'y faire un pointé. Cette disposition autour d'un angle $i = 0$ minimise les variations de la différence de marche liées aux variations d'incidence sur les lames. En effet, cette différence de marche varie comme $2e \cos i$ qui est stationnaire au voisinage de $i = 0$.

On s'arrange pour former une frange sombre sur l'un des diamètres des lames. On règle l'interfrange à une dizaine de millimètres. En pointant les franges à un dixième de millimètre près, on atteint ainsi une sensibilité de l'ordre du centième d'interfrange.

Ce sont les écarts de rectitude de la frange sombre qui déterminent les défauts de rectitude de l'un des plans si l'on suppose que l'autre est parfait. Pour que l'exactitude de la mesure soit à la hauteur de la sensibilité, il faut être sûr que les franges sont bien localisées sur le miroir étudié et il faut limiter en conséquence les angles d'incidence admis par le diaphragme. La luminosité du montage en est réduite, et le temps de pose avec des émulsions photographiques à grain fin est de l'ordre de 10 minutes.

Le montage exige donc une excellente stabilisation thermique pour que les différences de marche ne varient pas sur cette période de plus d'un centième de frange. La surexposition de la pellicule permet un affinement artificiel des franges très utile pour un dépouillement visuel des interférogrammes (figure 17).



Une surexposition de la pellicule dont la réponse est fortement non linéaire donne une finesse artificielle aux franges sombres, très utile pour un dépouillement visuel.

Figure 17 – Franges d'interférence à deux ondes données par l'inter-féromètre de Fizeau du laboratoire de métrologie de l'Institut d'Optique

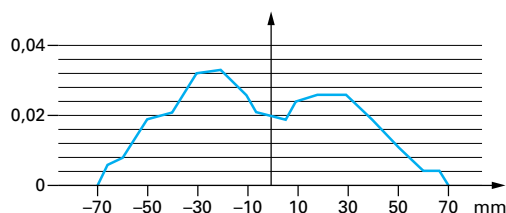
A cette échelle (le centième d'interfrange représente 3 nm sur les surfaces optiques), il faut tenir compte des déformations élastiques des miroirs soumis à la pesanteur. On verra une différence entre un miroir supporté en trois points d'appui et fléchi sous l'effet de son poids (figure 18b) et un miroir uniformément soutenu sur toute sa surface (figure 18a). Pour être sûr qu'il n'est pas déformé dans cette dernière configuration, le miroir inférieur est supporté par huit couches de papier velours dont la souplesse permet d'admettre une uniformité de la pression exercée. Les mesures faites dans cette configuration et avec trois points d'appui ont permis de retrouver la flexion calculable à partir des propriétés mécaniques de la silice.

L'interféromètre de Fizeau est aujourd'hui utilisé commercialement sous de nombreuses formes pour faire des études de surfaces planes, sphériques ou légèrement asphériques. L'exploitation des images de franges est faite intégralement par calcul numérique, et les différents modèles proposés aux utilisateurs diffèrent plus par la convivialité et la puissance des logiciels que par les performances des interféromètres eux-mêmes.

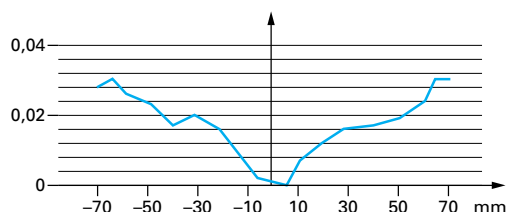
L'analyse des franges peut être faite de manière statique par analyse de leur courbure, mais de plus en plus ce sont des dispositifs à balayage (« phase shift ») qui sont exploités. En mesurant le signal interférentiel en chaque point du champ pour quatre positions (parfois huit ou seize) des lames offrant un angle de phase en progression arithmétique, on peut par des algorithmes appropriés extraire les variations de phase entre les différents points du champ et reconstruire ainsi la surface étudiée relativement à la surface de référence :

- si la surface étudiée est un plan, la surface de référence est un plan qui sera supposé parfait ;
- si la surface étudiée est une sphère ou proche d'une sphère, les interférences sont observées à travers un objectif supposé parfait au foyer duquel est centrée la sphère testée.

Le traitement des données permet, grâce aux calculateurs numériques, de donner le profil bidimensionnel de la surface. On réduira en général la surface à un nombre plus ou moins limité de paramètres en décomposant les écarts à la surface de référence en polynômes orthogonaux. Les opticiens ont l'habitude d'utiliser les polynômes de Zernike qui correspondent aux aberrations de l'optique géométrique.



(a) calibre non fléchi supporté uniformément sur toute sa surface



(b) calibre fléchi supporté en trois points à 120°

L'échelle est en interfranges.
Un interfrange vaut 273 nm.
Une graduation vaut 1,1 nm.
La matière est au-dessus, l'air en dessous de la courbe.

Figure 18 – Relevés sur un diamètre des écarts de rectitude d'un plan étalon du laboratoire de métrologie de l'Institut d'Optique

3.5.2 Mesures de rectitude et de planéité indépendantes de la référence

Comme pour les méthodes mécaniques, les défauts de rectitude de la pièce de référence peuvent aussi être compensés (§ 3.2.1), mais la symétrie des rôles joués par les deux miroirs rend la manipulation un peu plus compliquée. En effet, on ne peut observer les franges d'interférence entre une surface et l'autre surface retournée, parce qu'il y aurait l'épaisseur de la lame entre les deux surfaces, ce qui dénaturerait complètement les franges d'interférence. Grâce à un ensemble de trois lames, nous allons pouvoir faire des interférences avec retournement de manière indirecte.

Supposons (figure 19) trois miroirs dont les défauts algébriques de rectitude sur un diamètre particulier sont $z_1(x)$, $z_2(x)$ et $z_3(x)$. En plaçant le miroir 1 sur le miroir 2 on enregistre un signal, après dépouillement des franges, qui est égal à :

$$s_{12}(x) = z_1(x) + z_2(x).$$

On étudie ensuite la déformation des franges entre le miroir 1 et le miroir 3, puis enfin entre le miroir 2 et le miroir 3. Les trois signaux s'écrivent :

$$s_{12}(x) = z_1(x) + z_2(x).$$

$$s_{13}(x) = z_1(x) + z_3(x).$$

$$s_{23}(x) = z_2(x) + z_3(x).$$

Notons que tous ces signaux $s_{12}(x)$, $s_{13}(x)$, $s_{23}(x)$, $z_1(x)$, $z_2(x)$, et $z_3(x)$ ne sont définis qu'à une constante près et un terme linéaire en x près. On définit la constante en annulant la valeur moyenne sur chaque diamètre et la pente en minimisant l'écart quadratique

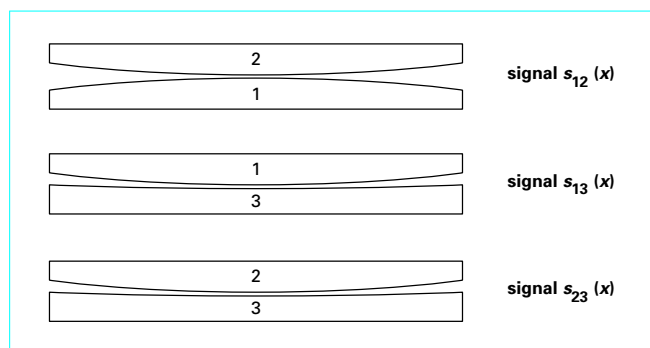


Figure 19 – Auto-étalonnage des rectitudes de pièces optiques par la méthode des trois plans

moyen sur chaque diamètre. De ces trois informations on tire les défauts de rectitude individuels de chacun des miroirs :

$$z_1(x) = \frac{1}{2} [s_{12}(x) + s_{13}(x) - s_{23}(x)]$$

$$z_2(x) = \frac{1}{2} [s_{12}(x) + s_{23}(x) - s_{13}(x)]$$

$$z_3(x) = \frac{1}{2} [s_{13}(x) + s_{23}(x) - s_{12}(x)]$$

Cette méthode exige donc la disposition d'un ensemble de trois miroirs plans de qualités à peu près équivalentes pour déterminer dans l'absolu les défauts de rectitude de l'un quelconque de ces plans qui servira ensuite de référence pour la mesure des défauts de rectitude d'un plan inconnu.

Comme on le voit, la mesure des défauts de rectitude qui consiste en la vérification de la stabilité d'un angle nul, n'exige aucun raccordement à un étalon particulier, mais permet, par l'emploi d'une procédure appropriée, un auto-étalonnage sur un instrument dont les propriétés de sensibilité et de répétabilité sont suffisantes.

4. Contrôle des défauts de courtes périodes spatiales. Profilométrie par faisceau laser

D'autres techniques optiques dérivées de l'autocollimation ont été développées en laboratoire pour tester, avec la meilleure sensibilité, la rectitude de surfaces optiques jusqu'à plusieurs dizaines de centimètres de diamètre, mais avec des périodes spatiales qui, sans entrer dans le domaine de la rugosité, se situent plutôt dans celui de ce que nous avons appelé les ondulations. Certains montages d'optique géométrique donnent d'excellents résultats dans ce domaine.

■ On peut contrôler des miroirs avec un **profilomètre** dont on peut décrire ainsi de manière simplifiée le principe du fonctionnement (figure 20). Un faisceau laser fixe est émis vers un système de miroirs et de prisme formant ce que l'on appelle une équerre optique. Ce système dévie le faisceau d'un angle qui ne dépend pas de l'orientation de l'équerre par rapport au faisceau et qui est égal au double de l'angle entre les deux faces du prisme. L'équerre se déplace au-dessus du miroir testé sur toute sa longueur (jusqu'à 1 m) et le faisceau réfléchi sous incidence à peu près normale retourne vers le laser où il est repris par une lame semi-réfléchissante vers un détecteur à quatre quadrants. Toute variation de direc-

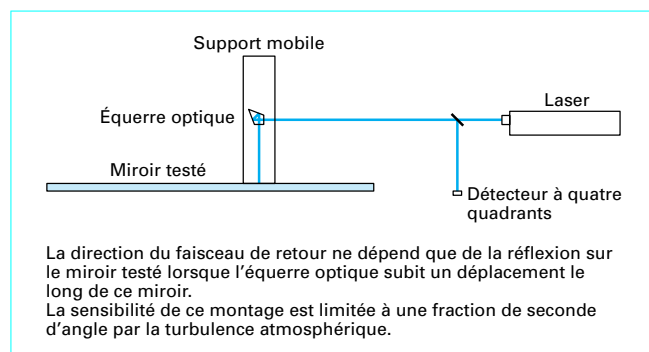


Figure 20 – Profilomètre à équerre optique

tion du plan de réflexion du miroir testé se traduit par une rotation d'un angle double du faisceau réfléchi. La sensibilité des cellules à quatre quadrants pour détecter une variation de direction d'un faisceau laser est excellente. Elle est limitée par les fluctuations d'indice dues à la turbulence de l'air. Notons à ce sujet que, dans une mesure de ce type, il vaut mieux avoir un brassage d'air qui donne un faisceau agité autour d'une direction juste, plutôt qu'une atmosphère calme où le faisceau bouge lentement, mais peut se retrouver dans des directions significativement différentes à cause de l'établissement d'un gradient d'indice.

■ Dans le cadre d'une collaboration franco-italienne, on construit dans la banlieue de Pise un grand **interféromètre** appelé **Virgo** (2×3 km) pour détecter les ondes gravitationnelles qui doivent nous parvenir du centre de la Galaxie ou des galaxies voisines de l'amas de la Vierge. Pour tester certains composants optiques de Virgo, on a mis au point, au laboratoire d'optique de l'École supérieure de physique et chimie de la ville de Paris, une technique de balayage par faisceau laser dont la sensibilité angulaire atteint quelques dixièmes de microradian.

● Un premier schéma de dispositif est donné par la figure 21. Un faisceau laser polarisé linéairement à 45° des lignes neutres d'un prisme de calcite qui sépare sans déviation deux polarisations rectilignes orthogonales de la lumière. Les deux faisceaux viennent se réfléchir sur l'échantillon et repartent sur un cube séparateur qui les renvoie tous deux vers un détecteur à quatre quadrants. Avant le détecteur un deuxième prisme de calcite sépare les deux faisceaux polarisés et les envoie sur les deux moitiés du détecteur. Un des faisceaux permet de centrer le détecteur sur la direction définie par le premier point de l'échantillon. L'autre faisceau permet de mesurer l'écart angulaire entre les faisceaux réfléchis par les deux points.

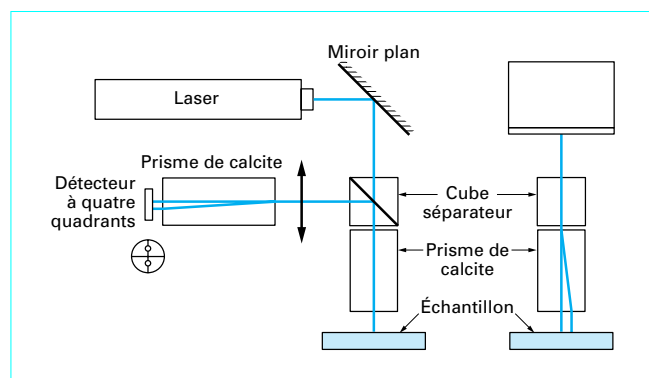


Figure 21 – Dispositif à laser pour contrôler la rectitude d'un miroir (d'après V. Lorient [9])

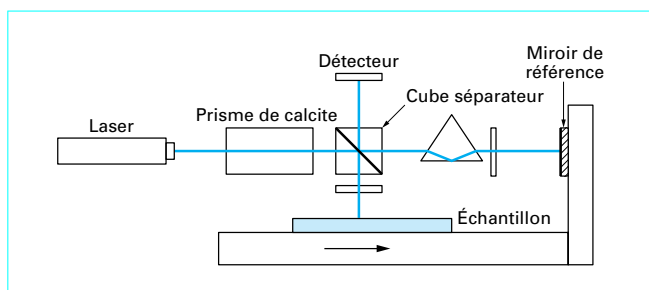


Figure 22 – Montage pour mesurer les variations de pentes de l'échantillon E par rapport au miroir de référence fixe par rapport à l'échantillon, indépendamment des défauts de la translation de l'échantillon et du miroir

(d'après V. Lorient [9])

C'est donc en quelque sorte une mesure de la courbure de l'échantillon au voisinage des deux points. En intégrant les variations angulaires enregistrées d'une extrémité à l'autre d'un diamètre de la pièce, on peut ainsi reconstituer le profil du miroir ou de la lame de silice avec une incertitude globale de l'ordre d'une fraction de nanomètre sur un diamètre de 40 mm. Cela revient à détecter des défauts de surface de l'ordre de $0,1\ \mu\text{m}$ sur un profil d'autoroute de 10 m de largeur.

• Dans un deuxième montage, donné par la figure 22, un miroir de référence et l'échantillon sont montés sur une même pièce mécanique susceptible de subir une translation dont l'amplitude est égale à la longueur de l'échantillon.

Ce schéma ressemble fort à un interféromètre qui comparerait l'échantillon au miroir de référence. Il n'en est rien : le cube séparateur est un dispositif qui transmet une direction de polarisation rectiligne de la lumière et qui réfléchit la direction de polarisation orthogonale. Le faisceau issu du laser est ainsi divisé en deux faisceaux polarisés par le prisme de calcite : l'un des faisceaux est transmis vers le miroir et l'autre faisceau est réfléchi vers l'échantillon.

Le faisceau transmis vers le miroir de référence traverse avec réflexion interne un prisme qui inverse le sens des déviations dues à un basculement du miroir. Ainsi, toute rotation de l'ensemble de la pièce mobile donne des rotations doublées et de sens inverses pour les deux faisceaux réfléchis par le miroir et par l'échantillon.

Dans chacun des bras, une lame quart d'onde traversée deux fois fait tourner le plan de polarisation de $\pi/2$, de telle sorte qu'au retour le faisceau qui a été transmis est réfléchi et le faisceau qui a été réfléchi est transmis. Les deux faisceaux qui ont été réfléchis indépendamment par le miroir et par l'échantillon sont donc tous les deux envoyés vers le détecteur.

Quand le support mécanique subit une translation, toute rotation de l'ensemble donne des rotations en sens opposés et est donc détectée et corrigée. En revanche, toutes les rotations du faisceau incident dues à la turbulence atmosphérique avant le cube séparateur sont compensées. Ce montage est donc capable de détecter toute variation de pente de l'échantillon par rapport au miroir de référence, et de reconstituer ainsi le profil de l'échantillon sur un diamètre.

5. Rugosité

On désigne par rugosité les aspérités et les creux d'une surface mesurés par rapport à la surface moyenne assimilée localement à un plan. La caractérisation géométrique de ce paramètre est délicate

parce qu'il s'agit d'un paramètre statistique qui ne peut être défini par une seule mesure, et parce qu'il s'agit d'une variable dépendant de deux dimensions, en général analysée suivant une seule dimension.

Comme tout paramètre statistique, son évaluation sera d'autant plus sûre qu'elle sera faite sur un domaine étendu, mais on se heurte alors aux défauts de forme de la surface qui ne permettent plus d'assimiler la surface moyenne à un plan. La norme internationale ISO 4287 actuellement soumise à enquête probatoire définit les différents paramètres permettant de caractériser la rugosité d'une surface. Sans être exhaustifs, rappelons que ce sont les hauteurs des saillies et les profondeurs des creux, les largeurs des éléments du profil qui sont une image très simplifiée du spectre des fréquences spatiales...

5.1 Paramètres de rugosité

La hauteur maximale du profil peut être mesurée sur le profil de surface (P_z), sur le profil de rugosité (R_z) ou sur le profil d'ondulation (W_z). Il en est de même pour la hauteur totale, somme de la plus grande hauteur et de la plus grande profondeur P_t , R_t ou W_t . Mais les paramètres les plus significatifs sont des moyennes arithmétiques (P_a , R_a , W_a) de l'écart à la surface de référence ou les moyennes quadratiques (P_q , R_q , W_q) de $z(x)$.

Dans l'étude de ce paramètre spatial, c'est en fait la distribution des amplitudes des défauts en fonction de leur période qu'il faut caractériser et, tout comme pour les mesures de bruit, c'est la largeur de bande des fréquences spatiales prises en compte qui caractérise la microgéométrie d'une surface. Dans les intercomparaisons, c'est la définition de ces spectres de fréquences spatiales observables qu'il est difficile de préciser.

5.2 Méthodes mécaniques par palpeur

5.2.1 Généralités

On mesure la rugosité d'une surface en déplaçant le long d'une ligne un palpeur suivant une direction parallèle à la surface moyenne à tester. 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 23a). 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 23b).

5.2.2 Filtrage lié au palpeur mécanique

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 (figure 24). Ce filtrage mécanique est souvent complété par un

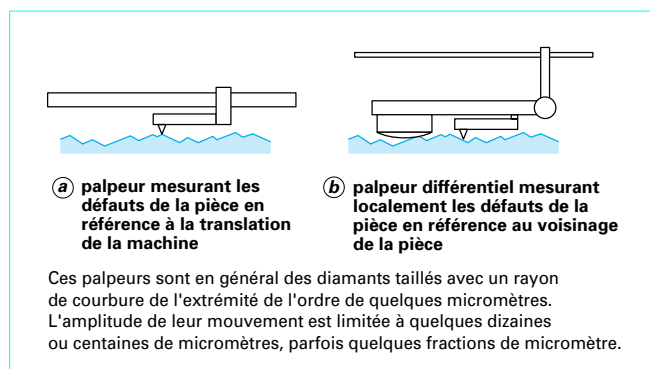


Figure 23 – Palpeurs pour l'étude de la rugosité

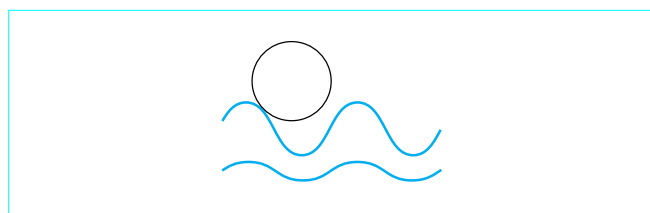
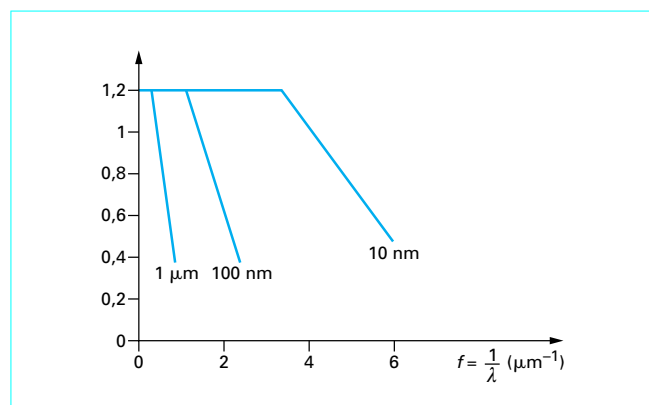


Figure 24 – Amplitude d'un défaut sinusoïdal de période donnée : elle n'est pas traduite de manière identique pour des amplitudes différentes de la modulation et la réponse du rugosimètre n'est donc pas linéaire

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).

Du côté des basses fréquences spatiales, le problème réside dans le choix de la surface de référence définie soit par l'instrument de mesure (rectitude d'une translation, parallélisme entre cette translation et la surface étudiée), soit par l'objet étudié lui-même qui peut servir à guider le palpeur. Nous verrons aussi des dispositifs optiques (§ 5.4) mettant en cause les deux polarisations d'une onde lumineuse et qui permettent la mesure différentielle entre un point de la surface et l'élément de surface qui l'entoure.

Le palpeur sera le plus souvent assimilé à une portion de sphère. Sa réponse à un défaut sinusoïdal peut être modélisée et on peut ainsi définir une fonction de transfert du palpeur en fonction de la période du défaut. Mais la réponse du palpeur n'est pas linéaire ; en particulier, une sinusoïde de période donnée sera intégralement transmise avec une faible profondeur de modulation, et sera atténuée pour une grande amplitude de modulation (figures 24 et 25). La lecture d'une surface réelle, qui comporte la superposition d'un grand nombre de composantes sinusoïdales (spectre des fréquences spatiales de la surface) ne donnera pas une réponse égale à la somme des réponses pour chaque composante sinusoïdale. En particulier, la lecture de la hauteur z du palpeur pour une position x sera donnée par un point de contact avec la surface qui ne sera pas toujours sur l'axe du palpeur. Par contre, si un filtrage des fréquences hautes est effectué par le système de lecture, on peut espérer que la réponse du palpeur pour ces fréquences spatiales basses devant la fréquence de coupure du palpeur restera linéaire.

Figure 25 – Amplitudes relatives transmises par un palpeur à bille de 1 μm de rayon en fonction de la fréquence spatiale pour trois amplitudes de défaut différentes (d'après L. Briel [10])

5.3 Étalonnage des palpeurs pour la mesure des rugosités

L'étalonnage de ces palpeurs est essentiel. Il existe plusieurs types d'étalons permettant de faire cet étalonnage dans de bonnes conditions (figure 26), offrant des défauts d'amplitudes et de périodes variées et connues, dont la forme peut être très différente d'un étalon à l'autre (sinusoïdes définissant un défaut de fréquence spatiale unique, arcs de cercle présentant des points anguleux, donc de hautes fréquences spatiales, spectre de rugosité uniforme analogue au bruit blanc des détecteurs électroniques, échelons de profondeurs variées).

Il n'est pas possible de travailler sur des cales d'épaisseur de quelques micromètres. Les boîtes de cales des ateliers de mécanique comportent une série de cales de faible épaisseur (1 mm) dont les épaisseurs sont en progression régulière par pas de 1 ou 2 μm . On étalonne un capteur sur quelques micromètres en contrôlant la différence des épaisseurs d'un couple de ces cales. L'incertitude d'étalonnage des cales est la plupart du temps une limitation à l'exactitude d'étalonnage du palpeur sur des variations aussi faibles. Une technique astucieuse développée au Laboratoire National d'Essais permet de réduire cette incertitude en fabriquant n intervalles de 1 μm avec n couples de cales dont les épaisseurs vont en progression arithmétique de 1 μm et en déterminant la lecture du palpeur sur la moyenne de ces n intervalles (figure 27). Si l'incertitude d'étalonnage d'une cale est σ_z , l'incertitude sur la différence d'épaisseur entre deux cales est $\sigma_z/\sqrt{2}$, et l'incertitude sur la moyenne de n différences d'épaisseurs qui ont des épaisseurs communes est $\sigma_z/\sqrt{2}/n$.

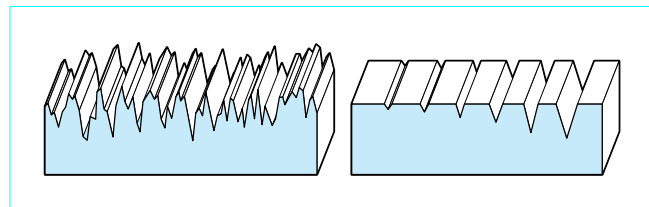
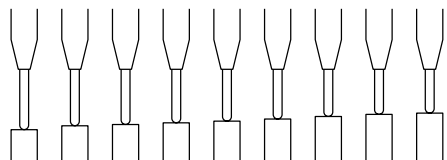


Figure 26 – Étalons de rugosité pour étalonnage des rugosimètres



Une série de cales de référence étalonnées par interférométrie directe ont une incertitude ε (de l'ordre de 10 à 50 nm). La différence entre deux cales successives (1 μm) est connue avec une incertitude de $\varepsilon\sqrt{2}$. La valeur de l'écart moyen entre deux cales successives mesuré avec le jeu complet de cales (10 cales : 9 intervalles) est connue avec une incertitude 3 fois plus faible.

Figure 27 – Étalonnage d'un capteur pour mesurer les écarts de rectitude ou de circularité

Dans une étude de diffusion de la lumière par une surface rugueuse, c'est la longueur d'onde de la lumière utilisée et l'ouverture du faisceau recueilli qui définissent les plus courtes périodes spatiales visibles, et là encore, la modélisation du processus de diffusion dépend de la polarisation de la lumière, du rapport entre l'amplitude des défauts et leur période, c'est-à-dire de la pente locale de la surface. Nous verrons cependant (§ 5.4.1 et figure 28) que quelques recoupements ont pu être faits entre des méthodes optiques et des méthodes mécaniques montrant que, dans un certain domaine de fréquences spatiales, il y a bon accord entre des méthodes d'évaluations très différentes.

Il est important, quand on veut caractériser la rugosité d'une surface, de préciser la signification du paramètre dont on donne la valeur numérique. En tout état de cause, la véritable justification d'un état de surface est, en général, une fonctionnalité (lubrification, frottement, réactivité chimique, pouvoir de diffusion, facteur de réflexion) qui ne peut jamais se réduire à l'un ou l'autre de ces paramètres. Ceux-ci doivent donc être considérés comme des contrôleurs de la répétabilité d'un processus de fabrication plus que comme une garantie que telle ou telle fonction de la surface sera assurée.

5.4 Méthodes optiques

5.4.1 Généralités

Pour les faibles rugosités, le palpeur mécanique devient vite insuffisant et des techniques de mesures optiques prennent le relais.

Une onde plane qui tombe sur une surface plane non totalement absorbante subit une réflexion et se propage sous forme d'une onde plane dans la direction donnée par les lois de Descartes. C'est ce que l'on désigne par le terme de réflexion spéculaire. Si les points voisins de la surface ne sont pas à la même hauteur, il en résulte un déphasage local de l'onde plane qui se traduit à long terme par de la lumière diffusée dans des directions autres que la direction de réflexion spéculaire. Des défauts de courte période devant la longueur d'onde ne sont pas vus par l'onde monochromatique. Des défauts de période voisine de la longueur d'onde diffusent la lumière dans des directions qui font un angle de l'ordre du radian avec la direction de réflexion spéculaire. Des défauts qui ont une période égale à un grand nombre k de longueurs d'onde diffusent la lumière dans une direction qui fait un angle de l'ordre de $1/k$ rad avec la direction de réflexion spéculaire.

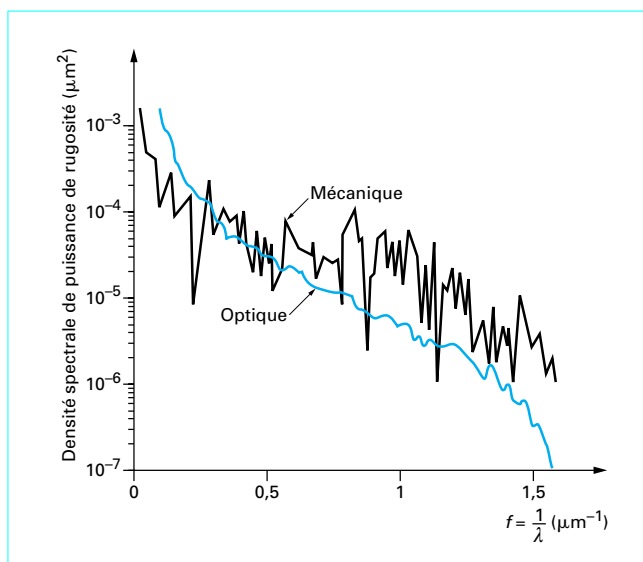


Figure 28 – Comparaison entre des densités spectrales de puissance obtenues dans la bande 0,1 à 1,5 μm^{-1} par palpeur mécanique et par diffusion optique
(d'après L. Briel [10])

Il est difficile de s'approcher de la direction de réflexion spéculaire à moins de 1° , soit $1,75 \cdot 10^{-2}$ rad. On ne pourra donc pas mesurer par ce procédé des défauts dont la période excède quelques centaines de longueurs d'onde. Ce sont les dispositifs optiques décrits paragraphe 5.1 qui permettent d'explorer ce domaine de fréquences spatiales. On élargit cependant beaucoup le domaine étudié par diffusion en travaillant avec des longueurs d'onde différentes depuis l'infrarouge ($\lambda = 1 \mu\text{m}$) jusqu'aux rayons X ($\lambda = 0,1 \text{ nm}$).

L'intensité de la lumière diffusée dans une direction donnée est proportionnelle au carré de l'amplitude de la composante de la rugosité pour une période spatiale qui donne dans cette direction le premier ordre d'interférences constructives d'un réseau. C'est ainsi que l'analyse goniophotométrique de la lumière diffusée donne une représentation de la densité spectrale de puissance des rugosités (en termes de fréquences spatiales). L'analyse est bidimensionnelle, car pour une incidence donnée sur la surface, incidence en général nulle, il faut analyser la distribution de lumière diffusée en fonction de l'angle α avec la direction d'incidence, et en fonction de l'angle φ que fait le plan d'analyse par rapport à une direction origine sur la surface diffusante. Il est inutile de faire varier φ si la structure est **isotrope**, mais il faut faire varier φ entre 0 et π si la structure présente une quelconque **anisotropie**.

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

L'**inconvénient** est que la mesure n'a de sens que si cette amplitude est faible devant la longueur d'onde (si la surface est très rugueuse la lumière est uniformément diffusée dans toutes les directions et ne représente plus la topographie de la surface) et la présence de la moindre poussière peut dénaturer les résultats. Ces mesures doivent donc être réservées à des états de 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 28).

5.4.2 Palpeurs optiques différentiels

■ Une mesure différentielle est faite par certains **rugosimètres optiques** qui reprennent un principe établi en microscopie par Françon et Nomarski. En jouant avec deux directions orthogonales de polarisation de l'onde électromagnétique, on peut faire d'une source lumineuse ponctuelle deux images juxtaposées. Il suffit d'inclure dans le schéma optique un dispositif biréfringent comme un prisme de Wollaston. Les faisceaux réfléchis par la surface étudiée sont repris à travers un analyseur qui fait interférer les deux polarisations et donnent une information sur la différence de trajet optique entre les deux images voisines (figure 29). Il s'agit encore d'un système de palpeur en deux points dont la fonction de transfert est limitée vers les basses fréquences spatiales par l'inverse de la distance des deux images, et vers les hautes fréquences spatiales par la largeur de chaque image.

Cette mesure différentielle s'apparente à la variance d'Allan à deux échantillons exploitée dans la mesure des bruits sur les signaux temporels en présence de dérives et de bruits de scintillation.

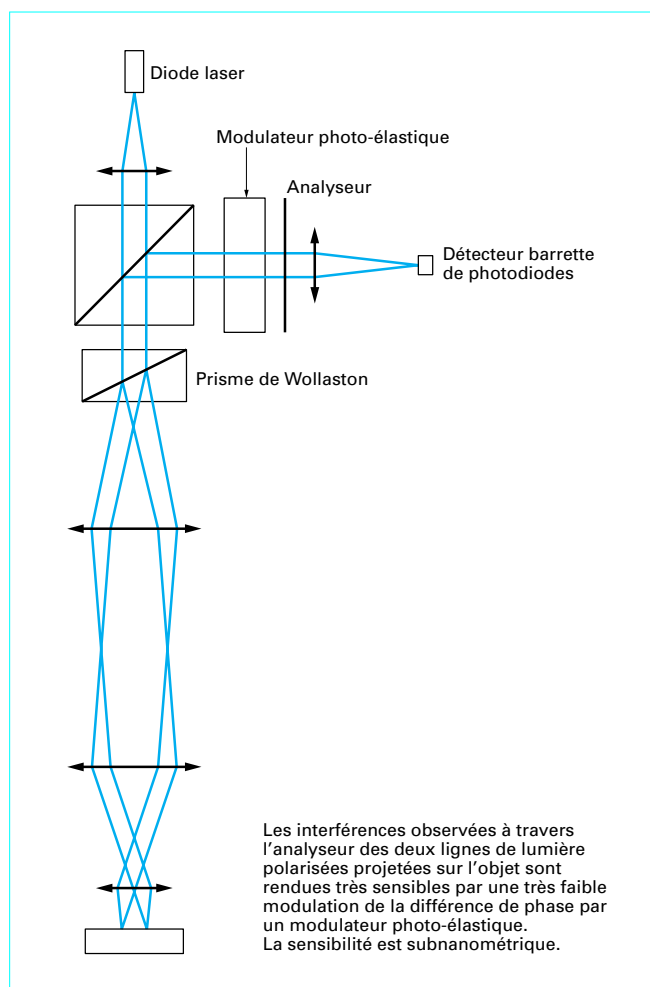


Figure 29 – Microscope interférentiel à polarisation pour l'étude de la rugosité

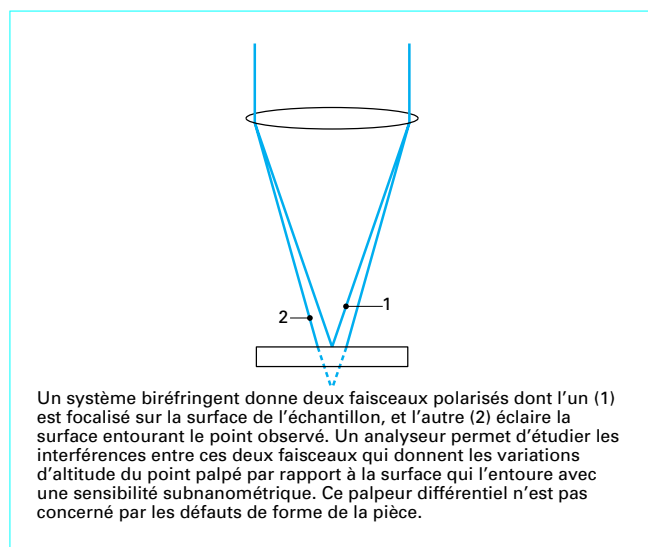


Figure 30 – Rugosimètre optique à polarisation : signal fourni

■ Dans les rugosimètres, les images sont décalées le long de l'axe, et l'on observe les interférences entre une tache ponctuelle dont les dimensions sont déterminées par l'ouverture numérique de l'objectif et l'autre qui, défocalisée, donne une information sur une plage entourant la tache précédente sur quelques dizaines ou centaines de micromètres carrés (figure 30).

Le **signal interférentiel** donne ainsi une information qui peut atteindre une très faible fraction de longueur d'onde (moins du millième de longueur d'onde, soit quelques fractions de nanomètre) entre l'altitude de la tache ponctuelle et l'altitude moyenne de la plage environnante. La résolution en x et y du spot est de quelques micromètres, elle est déterminée par la longueur d'onde d'analyse et l'ouverture numérique de l'objectif :

$$\delta x = \lambda / (n \sin u)$$

où n est l'indice de réfraction du milieu situé entre l'objectif et l'objet (air ou huile pour un objectif à immersion) et u le demi-angle sous lequel on voit l'objectif depuis l'objet.

6. Au-delà de la rugosité, les nouvelles microscopies, sondes de surface

Pour aller au-delà de la rugosité jusqu'à la structure des surfaces de matériaux divers à l'échelle du nanomètre existent depuis quelques années des instruments dont la résolution spatiale approche celle des microscopes électroniques. La microgéométrie des surfaces solides est ainsi étudiée à l'échelle subnanométrique par une catégorie d'instruments nouveaux, les **microscopes à effet tunnel** électronique ou optique, les microscopes à champ proche, et les microscopes à force atomique.

■ Le premier microscope à effet tunnel est électronique. Une fine fibre conductrice (pointe de tungstène dont des techniques de traitement physico-chimique donnent à la pointe un rayon de quelques dizaines de nanomètres) est approchée de la surface à une distance

telle que le contact ne se fasse pas, et les charges électriques présentes sur l'objet traversent la zone isolante par effet tunnel. Les variations de ce courant électrique collecté par la pointe peuvent donner une image électrique de la topographie de la surface. L'échantillon est déplacé sur une très faible amplitude (quelques micromètres) par un double balayage en x et en y effectué par des céramiques piézo-électriques. La stabilité mécanique du balayage, sa répétabilité doivent être à la hauteur de la **limite de résolution** latérale et verticale, de l'ordre d'une fraction de nanomètre. Ce dispositif a permis de visualiser des atomes à la surface d'un cristal, et même de manipuler ces atomes adsorbés à la surface du cristal comme des billes sur un boulier.

Deux modes de fonctionnement existent pour ce type de microscope, qui présente sur les microscopes électroniques classiques l'avantage de travailler à la pression atmosphérique et de pouvoir s'appliquer à toutes sortes d'échantillons conducteurs sans traitement spécial.

- Dans un mode simple permettant un balayage rapide d'un élément de surface de l'échantillon, on se contente d'enregistrer les variations du courant électrique dans la pointe.
- Dans un mode plus métrologique, l'intensité du courant électrique est asservie à une valeur constante en agissant sur la hauteur de la pointe par rapport à la surface. On peut ainsi espérer suivre les aspérités de la surface à hauteur constante, et donc faire une image fidèle de la topographie. Cependant, les variations des propriétés électriques locales de l'échantillon (travail de sortie des électrons lié à la structure physico-chimique locale) peuvent induire des artefacts dans la géométrie de la surface apparente. Ce procédé est beaucoup plus lent et ne permet pas de donner une image en moins de quelques secondes.

■ Pour des échantillons isolants, cette technique n'est pas applicable. Mais une variante consiste à étudier les variations de la force de type Van der Waals appliquée par la surface sur une pointe du même type portée par un support flexible. Le **microscope à force atomique**, bien que fonctionnant sur un principe complètement différent, présente les mêmes performances et la même structure que le microscope électronique à effet tunnel. C'est la déformation d'un palpeur souple et ultraléger, détectée par moyen optique ou électrique, qui donne l'information sur la topographie de la surface balayée. La limite de résolution latérale de ces microscopes est de l'ordre de quelques nanomètres, et la résolution verticale à peu près dix fois meilleure. La difficulté dans l'interprétation des images données par ces microscopes est l'étalonnage en z , qui ne donne que des ordres de grandeur (figure 31).

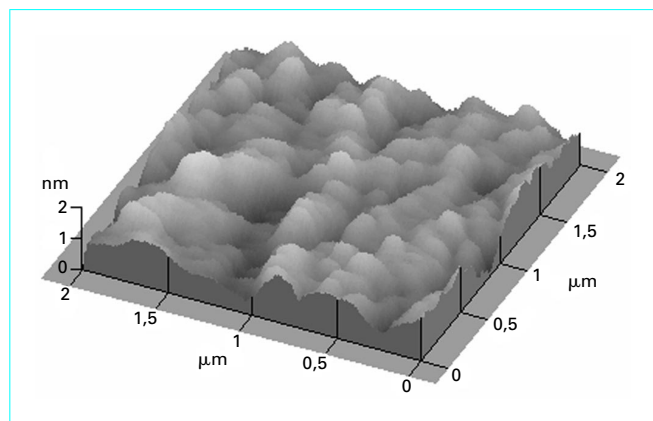


Figure 31 – Échantillon de silice superpolie examiné au microscope à force atomique

[doc. Institut d'Optique, aimablement communiqué par M. Mullot]

■ C'est enfin le **microscope optique en champ proche**, parfois aussi appelé microscope à effet tunnel optique, qui utilise l'extrémité taillée en pointe et recouverte d'une couche métallique d'une fibre optique unimodale. Cette fibre, en s'approchant d'une surface transparente éclairée de l'intérieur par une onde sous une incidence telle que toute la lumière soit réfléchiée (réflexion totale interne), recueille quelques photons par un effet tunnel que l'on appelle la **réflexion totale interne frustrée**.

La résolution de ces pointes optiques est un peu moins bonne que celle des microscopes électroniques à effet tunnel ou à force atomique, mais elle est dix fois meilleure que celle des microscopes optiques limités en champ lointain par les phénomènes de diffraction. Le microscope en champ proche obtient les mêmes performances sur des substances opaques en amenant la lumière par la fibre optique ou par un éclairage uniforme extérieur, et en détectant la lumière rétrodiffusée dans la fibre au niveau de la pointe. Les variations de la distribution du champ électromagnétique au voisinage de la surface conservent les variations des propriétés optiques locales de la surface sans être limitées par la diffraction si cette lumière est collectée à une distance de la surface petite devant la longueur d'onde lumineuse. Le microscope optique en champ proche a ainsi brisé un mur de la résolution spatiale sur lequel bute la microscopie optique depuis le siècle dernier.

La encore, la difficulté réside dans l'étalonnage de la variable z , qui est mesurée indirectement par un phénomène électrique ou électromagnétique. Des étalons sont à l'étude pour reproduire quelques motifs de dimensions connues à cette échelle. Mais chaque application, chaque nature de matériaux mise en jeu doit faire l'objet d'un étalon spécifique. C'est dans chaque discipline que l'expérimentateur doit apprendre la confiance qu'il peut accorder aux résultats de ces investigations à une échelle bien éloignée de celle où nous avons l'habitude d'évaluer nos incertitudes.

7. 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 artefacts insoupçonnables d'une technologie particulière. Les méthodes optiques et les palpeurs mécaniques, les microscopies à effet tunnel, à force atomique ou en champ proche sont des techniques très différentes dont aucune n'est absolument meilleure que les autres. Elles sont toujours plus ou moins complémentaires.