

CONTRÔLE D'ÉTATS DE SURFACE

Mesure de rugosité : et pourquoi pas la microscopie holographique numérique ?

Avec un simple objectif de microscope, une caméra numérique et des outils de traitement d'image, la microscopie holographique numérique a fait son entrée dans le contrôle des états de surface. Par rapport aux méthodes traditionnelles, basées sur d'autres principes optiques ou à contact, elle offre de précieux avantages. La mesure est rapide et précise, elle permet de connaître la rugosité d'un échantillon à partir d'une seule acquisition d'image, et sans aucun balayage. Grâce à ces atouts, la méthode vient compléter le champ d'applications des systèmes interférométriques ou confocaux, notamment dans la mesure des rugosités de faible amplitude en milieu industriel. Nous avons demandé à la société suisse Lyncée Tec de faire un petit tour d'horizon de cet outil prometteur encore trop peu connu...

L'holographie, c'est un peu la frontière entre la deuxième et la troisième dimension... Une sorte d'illusion qui donne envie d'approcher la main d'une image pour voir si l'on peut "toucher" l'objet qu'elle représente. Depuis la découverte de son principe par le physicien hongrois Denis Gabor à la fin des années 40, la technique a toujours suscité un très grand intérêt. Pour comprendre cet engouement, il faut revenir à quelques notions fondamentales... Si nous voyons le relief des objets qui nous entourent, c'est parce qu'ils modifient, avant de la réémettre, la lumière qu'ils reçoivent.

Les variations d'intensité lumineuse d'un point à l'autre de l'objet affectent l'amplitude de l'onde, tandis que le relief de la surface en modifie la phase (en "obligeant" l'onde à parcourir des trajets plus ou moins longs). Dans les systèmes de photographie ou de microscopie classiques, seule l'intensité lumineuse de l'onde émise par l'objet est exploitée. Une partie de l'information transportée par le front d'onde est donc perdue. L'astuce de Gabor

consiste en quelque sorte à "coder" les variations de phase sous forme de variations d'amplitude, afin de restituer, sur une surface photosensible, toute l'information contenue dans le front d'onde. Il ne reste alors qu'à rééclairer cette surface pour reconstituer une image tridimensionnelle...

Les premières expériences, à l'époque de Gabor, utilisent une simple plaque photographique. Mais avec l'introduction du laser et du traitement numérique dès le début des années 60, l'holographie va changer d'image. Les plaques photographiques cèdent leur place à des caméras analogiques, puis numériques. Celles-ci enregistrent la totalité du front d'onde réémis par l'objet à travers un objectif de microscope. Quant au processus de rééclairage de l'hologramme, il est remplacé par un traitement numérique... C'est la naissance de la **microscopie holographique numérique** ou DHM (pour Digital Holography Microscopy).

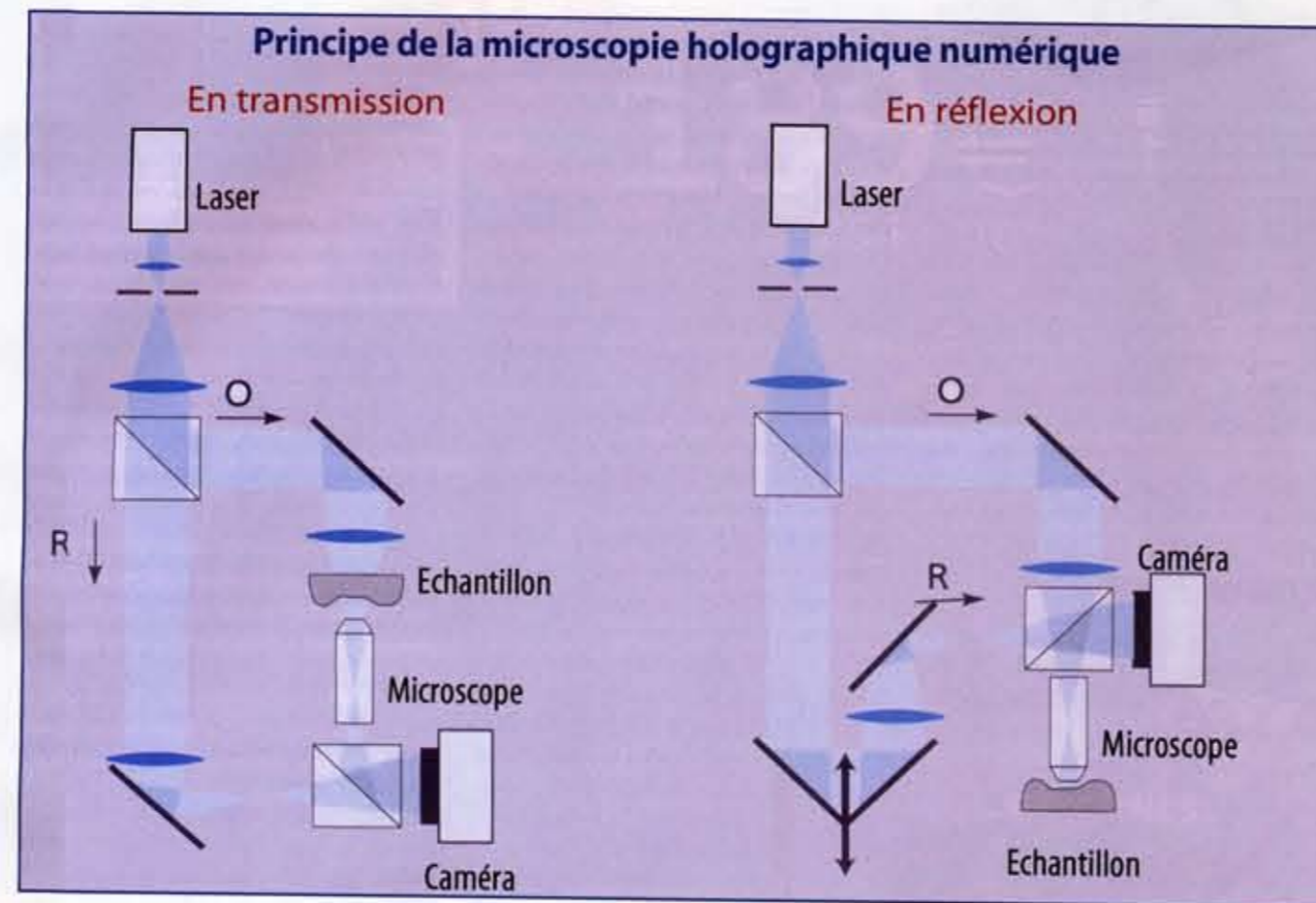
La technique est désormais employée dans un large éventail d'applications, aussi bien en laboratoire qu'en production. On l'utilise pour réaliser des contrôles dimensionnels, des contrôles de planéité, pour surveiller l'usure des pièces (tribologie), contrôler la propreté de leur surface, ou même détecter les défauts internes de matériaux transparents (tels que les défauts des plans cristallins). Depuis quelque temps, la méthode a aussi prouvé qu'elle avait son mot à dire dans le contrôle des états de surfaces.

Dans ce domaine, ce ne sont pourtant pas les méthodes qui manquent. Le plus souvent,

les paramètres de rugosité sont mesurés à l'aide d'appareils à contact. Les **rugosimètres** (ou profilomètres à contact) sont basés sur le déplacement d'une pointe à la surface de l'échantillon. En effectuant une série de balayages, ils reconstituent le relief de la surface. La technique a largement fait ses preuves (elle fait d'ailleurs l'objet de nombreuses normes), mais elle souffre de plusieurs inconvénients. La mesure des rugosités de faible amplitude (inférieures à quelques dizaines de micromètres), par exemple, est difficile. A cette échelle, les vibrations ambiantes peuvent être du même ordre de grandeur que la rugosité mesurée. Par ailleurs, le contact avec l'échantillon peut endommager les surfaces les plus fragiles. Enfin, les résultats obtenus dépendent de la dimension relative de la pointe de l'instrument par rapport au profil de l'échantillon. Il est par exemple difficile d'avoir une représentation correcte du relief de la surface lorsqu'il présente des vallées étroites.

Des mesures précises mais relativement longues

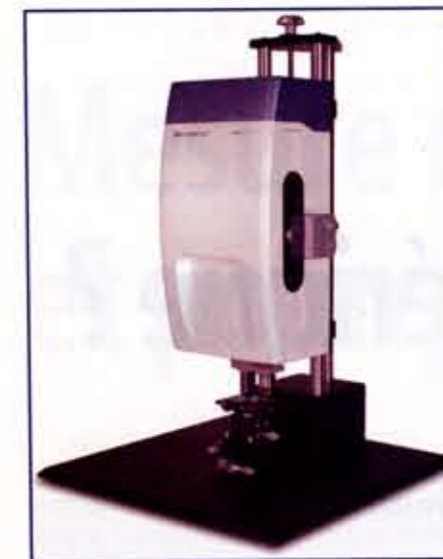
Pour pallier ces inconvénients, il existe un certain nombre de méthodes optiques, telles que l'interférométrie ou la microscopie confocale. Dans un **interféromètre**, le front d'onde émis par la source est séparé en deux faisceaux cohérents : l'un est réfléchi par une surface de référence, l'autre par l'échantillon. Lorsque les deux faisceaux sont recombinés, ils génèrent des interférences qui permettent de reconstituer la topographie de la surface.



Les interféromètres les plus classiques associent deux modes de fonctionnement : le balayage vertical et le décalage de phase. Ces instruments se distinguent par une large gamme de mesure verticale (de quelques dixièmes de nanomètres à plusieurs millimètres). Autre avantage, la résolution latérale est relativement élevée (typiquement de l'ordre du micromètre, pour des mesures de rugosité sur un champ de $0,5 \times 0,5 \text{ mm}^2$). En revanche, ces méthodes nécessitent de réaliser un balayage vertical, ou de déplacer l'échantillon (ou un miroir de référence) entre chaque acquisition. Dans le cas du décalage de phase, la mesure présente en outre des "sauts de phase" tous les quarts de lon-

gueur d'onde (160 nanomètres). La différence de hauteur entre deux points voisins mesurés ne doit donc pas dépasser cette valeur, ce qui limite le champ d'applications au contrôle de surfaces peu rugueuses. Pour mesurer des surfaces de plus grande rugosité (telles que le papier ou le cuir), on utilise plutôt les **capteurs confocaux**, basés sur les propriétés de focalisation de la lumière. Il existe là encore deux grands modes de fonctionnement. Dans les capteurs dits "à aberration chromatique", une source de lumière blanche éclaire la surface de l'échantillon à travers un ensemble optique présentant une forte aberration chromatique. En réalisant une analyse spectrale de la lumière

rétrodiffusée par cette surface, on en déduit l'altitude du point éclairé. Dans les capteurs "à détection d'intensité", c'est le déplacement vertical du capteur qui permet d'obtenir une lumière focalisée sur l'échantillon, et d'en déduire le relief de la surface. Ces deux systèmes offrent une large gamme de mesure verticale (de quelques dizaines de nanomètres à plusieurs millimètres) et une résolution latérale pouvant aller jusqu'à 1 micromètre. La dimension du champ de mesure n'est limitée que par la taille du porte-échantillon, ce qui permet de contrôler de grandes surfaces. En revanche, les microscopes confocaux sont des instruments de mesure ponctuels. Pour obtenir une re-



Par rapport aux interféromètres ou aux microscopes confocaux, les microscopes holographiques numériques permettent de réaliser des mesures rapides et précises, aussi bien en laboratoire qu'en production.

présentation tridimensionnelle de la surface, il est nécessaire d'effectuer un balayage. Le temps de mesure est donc relativement long (il faut compter près d'une minute pour mesurer la rugosité d'une surface de $0,5 \times 0,5 \text{ mm}^2$). La précision, enfin, dépend non seulement du capteur, mais aussi de la précision du déplacement de la table de mesure ou du système de balayage du faisceau...

Un bon compromis

La microscopie holographique numérique ne présente pas ces inconvénients. Elle permet en effet de connaître la topographie d'une surface à partir d'une seule acquisition

d'image, avec une résolution verticale nanométrique.

Son principe est relativement simple. Suivant la nature de l'échantillon observé (transparent, semi-transparent ou réfléchissant), les microscopes holographiques numériques peuvent être utilisés en transmission ou en réflexion. En réflexion, le faisceau laser incident est séparé en un faisceau de référence et un faisceau objet. Le faisceau objet arrive sur l'échantillon après avoir traversé l'objectif du microscope. Il est ensuite diffracté par l'échantillon et dirigé vers la caméra, où il est combiné avec le faisceau de référence pour former un hologramme.

En transmission, le principe est presque le même, si ce n'est que le faisceau objet traverse d'abord l'échantillon avant d'arriver sur l'objectif du microscope. Il est ensuite dirigé vers la caméra, où il est combiné avec le faisceau de référence pour former l'hologramme.

Dans les deux cas, la suite est identique. L'hologramme acquis par la caméra numérique est exploité par un logiciel de traitement spécifique qui extrait, en un dixième de seconde, les informations d'intensité et de phase du front d'onde. L'image en intensité est celle que l'on peut obtenir à partir d'un microscope "classique", tandis que la phase révèle la topographie de la surface avec une résolution verticale de l'ordre du nanomètre.

Pour extraire les paramètres de rugosité de la surface, il n'y a qu'à poursuivre le traitement numérique de l'hologramme. On accède d'abord à la surface dite "résiduelle" (composée des paramètres d'ondulation et de rugosité) en supprimant le facteur de forme. Reste ensuite à utiliser un filtre fréquentiel pour séparer l'ondulation (composée des basses fréquences) de la rugosité (à haute fréquence).

L'une des particularités de la méthode réside dans la possibilité d'enregistrer des hologrammes en configuration "hors axe". Dans ce cas, les directions du faisceau de référence et du faisceau objet ne sont pas rigoureusement parallèles, mais décalées de quelques degrés. Grâce à cette configuration, il est possible de reconstruire les images de phase et d'intensité à partir d'un seul hologramme. Les temps d'acquisition et de mesure sont donc très courts. Pour donner un ordre d'idées, il suffit d'un dixième de seconde

pour connaître la rugosité d'un échantillon de $0,5 \times 0,5 \text{ mm}^2$...

Autre avantage, l'absence de tout mécanisme de balayage. Grâce à cette particularité, les microscopes holographiques numériques offrent une grande robustesse. Les résultats ne sont pas affectés par la présence de vibrations ou par le déplacement d'une partie mobile. La méthode est donc aussi bien destinée à des applications de recherche et développement qu'à des contrôles de production, en bord de ligne.

Comme elle n'est pas sensible aux vibrations, il est possible de mesurer de plus faibles rugosités qu'avec les systèmes classiques. Un microscope holographique permet d'atteindre une résolution verticale de quelques dixièmes de nanomètres. La gamme de mesure verticale, quant à elle, est limitée par la profondeur de l'objectif. Pour un champ de vue de $0,5 \times 0,5 \text{ mm}^2$, elle est de l'ordre d'un micromètre. La résolution latérale, enfin, est comparable à celle des méthodes interférométriques (de l'ordre du micromètre, voire moins).

La microscopie holographique permet a priori de mesurer tous types de surfaces, y compris celles dont le relief présente des pentes importantes, du moment que la lumière est réfléchie dans l'angle de vue du microscope. Néanmoins, le champ d'applications privilégié de la méthode reste la mesure des faibles et des moyennes rugosités. Pour étendre la gamme de mesure verticale, il est possible d'utiliser les microscopes holographiques suivant un mode de balayage vertical. Les caractéristiques de la mesure sont alors similaires à celles d'un microscope interférométrique en balayage vertical.

Pour la mesure de surfaces relativement importantes, la microscopie holographique est limitée par le champ de vue du microscope, à des dimensions de quelques millimètres. Seuls les microscopes confocaux ne présentent pas cette limitation (il n'y a qu'à déplacer l'échantillon avec la table de mesure). Dernière limitation de la microscopie holographique, la mesure d'états de surfaces présente des sauts de phase. La différence de hauteur entre deux points voisins mesurés ne doit pas dépasser une demi-longueur d'onde (soit 340 nanomètres).

On le voit, chaque méthode a un champ d'applications qui lui est propre. Suivant l'état de surface de l'échantillon, ses dimensions et le type de mesure que l'on souhaite réaliser, on privilégiera l'une ou l'autre d'entre elles...

Yves Emery
Lyncée Tec

L'essentiel

- Pour mesurer la rugosité d'une surface, on utilise le plus souvent des méthodes à contact ou des systèmes optiques basés sur l'interférométrie ou la microscopie confocale.
- Depuis peu, la microscopie holographique numérique a montré qu'elle avait elle aussi des arguments pour se faire une place dans ce domaine.
- Par rapport aux systèmes classiques, elle se distingue par sa robustesse, sa rapidité et sa résolution.