

ACHETER

Un analyseur de surface optique (ASO)

Emmanuel HUGOT - emmanuel.hugot@lam.fr

Aix Marseille Université - CNRS Laboratoire d'Astrophysique de Marseille

La mesure de qualité des surfaces optiques est une problématique centrale de divers domaines : fabrication optique (on ne peut fabriquer que ce que l'on sait mesurer), optique active et adaptative (on ne peut corriger que ce que l'on a mesuré), voire l'interférométrie pour la détection d'ondes gravitationnelles (!). Cet article, sans chercher à être exhaustif, vise à donner quelques clefs pour aider au choix d'un analyseur de surface optique (ASO), en fonction des applications visées et des types de surface à mesurer.

L'analyse de surface d'onde par méthodes optiques est basée sur un principe simple : l'envoi d'un signal de référence sur une surface à tester, puis la récupération de sa distorsion due à cette surface. On mesure alors la différence entre la référence et le signal de retour, ce qui signifie que la qualité de la référence elle-même doit être connue. On ne peut mesurer que les transformations d'intensité, et l'on cherche à

mesurer la phase de l'onde. Le rôle des analyseurs de surface est donc de coder les variations de phase en intensité, afin de pouvoir extraire cette information.

Les caractéristiques et performances des ASO diffèrent en fonction des méthodes de codage adoptées. Le choix de votre ASO dépend donc de votre application, et on pourra alors lister comme paramètres : la précision de mesure recherchée, les fréquences spatiales que

HASO

R.FLEX

The most practical and cost effective metrology tool for characterizing optical components such as large concave mirrors, lenses, complex optical systems, and beam expanders



**COMPACT
AND SELF-ILLUMINATION
METROLOGY TOOL
FOR LARGE OPTICS**

**EASY TO USE
AND VERSATILE**

**LARGE DYNAMIC
AND HIGH ACCURACY**

Contact us for more details:
contact@imagine-optic.com
or +33 1 64 86 15 60

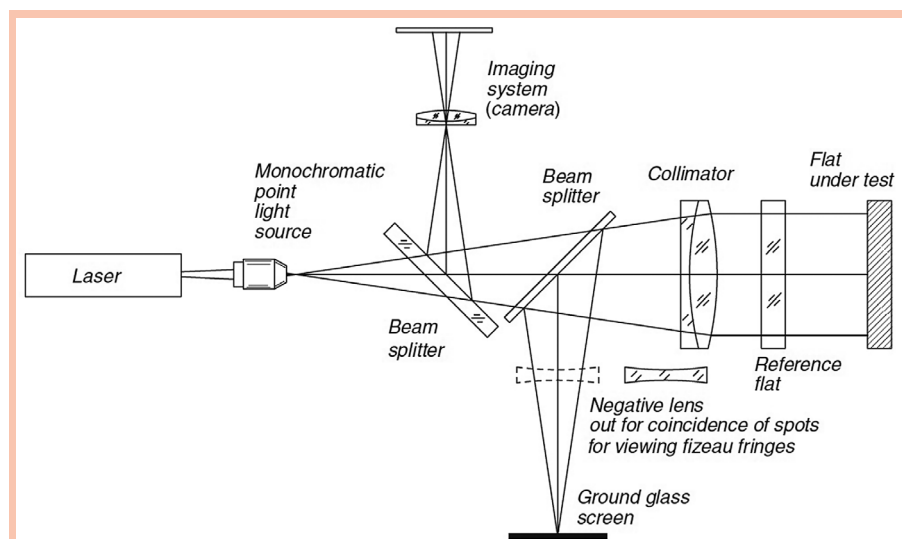


Figure 1. Les divers éléments d'un interféromètre de Fizeau (voie d'illumination, référence et voie d'imagerie). Dans ce schéma on ajoute un écran intermédiaire afin de faciliter les premières étapes d'alignement lors de la mesure. (Crédit : Optical Shop Testing, Malacara)



PHASICS

Analyse de surface optique haute résolution

Le double passage simple et compact

pour toute surface: plane, aspherique, grand diamètre...

Plus d'informations sur notre nouveau site: www.phasics.fr

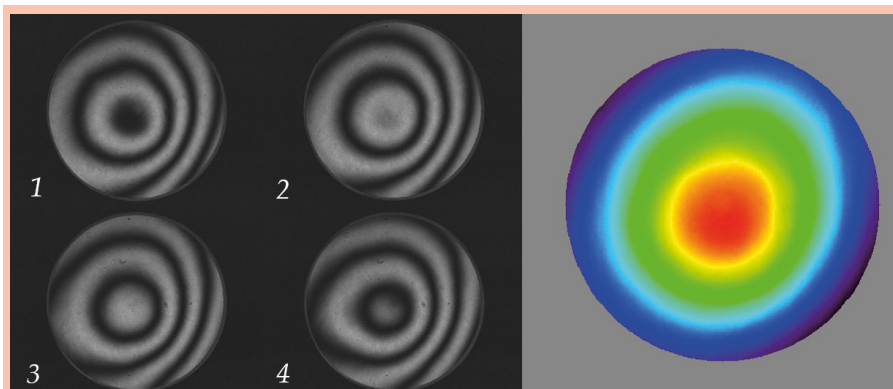


Figure 2. Principe de décalage de phase afin de permettre la reconstruction de la surface à mesurer.

l'on souhaite mesurer (ce qui va définir le nombre de points de mesure), l'amplitude des aberrations attendues (ce qui va définir la dynamique de l'analyseur), la forme de la surface (plane, concave, convexe, freeform), le caractère statique ou dynamique de la mesure, ainsi que la stabilité de l'environnement de travail. On pourra distinguer également les analyses en plan pupille ou en plan focal, qui requièrent des méthodes de reconstruction différentes.

À ce stade de l'article, voici une référence à connaître : *Optical Shop Testing* de D. Malacara. Vous trouverez certainement le type de montage optique dont vous rêvez en fonction de votre besoin, détaillé de manière théorique et pratique.

Densité spectrale de puissance

Si vous vous demandez quel est le rapport entre ASO et DSP, sachez que la DSP est justement le paramètre principal qui va guider le choix de votre analyseur. La DSP se définit comme le module carré de la transformée de Fourier du front d'onde. Elle caractérise les erreurs de front d'onde en fonction de leur fréquence spatiale.

Les erreurs de forme sont les erreurs de basse fréquence spatiale. On parle ici des aberrations de focus, astigmatisme, coma, sphérique, trèfle, etc. Leur caractérisation ne requiert qu'un faible nombre de points de mesure. Inutile donc de sortir votre interféromètre à très haute définition ($2k \times 2k$ points de mesure) si vous souhaitez uniquement vérifier quelle est l'aberration sphérique résiduelle sur une surface. Un analyseur de type Shack

Hartmann avec un nombre modéré de sous-pupilles sera largement suffisant.

Les domaines des *moyennes et hautes fréquences spatiales* sont définis en fonction des applications recherchées. Chaque domaine d'activité a sa définition propre, ce qui assez perturbant pour les néophytes. En fabrication optique, une pratique courante consiste à assimiler rugosité et hautes fréquences spatiales. La caractérisation de ces erreurs s'effectuera alors avec un rugosimètre adapté, généralement sur des fenêtres de $200 \mu m \times 200 \mu m$.

En optique adaptative, le domaine des moyennes fréquences spatiales se situe à l'intérieur du rayon de correction du système. En d'autres termes, ce domaine correspond à ce qui est mesurable par l'analyseur du système. Les spécifications des surfaces optiques seront données en regard de ce paramètre.

Interférométrie optique

Dans la forêt de types d'interféromètres proposés, attardons-nous sur l'interféromètre de Fizeau, certainement l'un des plus robustes et des plus adaptés à tout type de surface classique. Un interféromètre de Fizeau est composé de trois éléments principaux : (1) une voie d'illumination, (2) une référence et (3) une voie d'imagerie. L'interféromètre de Fizeau mesure toute distorsion du front d'onde dans la cavité Fizeau, c'est-à-dire entre la face de sortie du calibre de référence, et la surface à mesurer. Les interféromètres Fizeau du commerce imagent les franges d'interférence sur des caméras à très grand nombre de pixels, ce qui permet d'obtenir un bon échantillonnage

des franges, et d'assurer une dynamique de mesure de plusieurs dizaines de microns. Les caméras classiques en 512×512 vous permettront de mesurer jusqu'à 125 franges de tilt, soit entre 30 et 40 microns d'amplitude sur ce mode. Un tel échantillonnage vous permettra également de mesurer des fréquences spatiales jusqu'à 200–250 cycles par pupille.

Les technologies de reconstruction de la phase avec un Fizeau se font par « décalage de phase », ce qui consiste à prendre entre 3 et 5 images des franges en faisant varier la taille de la cavité Fizeau de $\pi/2$ entre chaque image. Les algorithmes de reconstruction permettent alors de remonter à la phase pixel par pixel.

Différents types d'analyseurs et de méthodes

Dans le cas de la mesure de surface optique en environnement perturbé, on cherchera à avoir des prises de vues rapides et instantanées afin de figer les vibrations ou encore la turbulence locale. La moyenne d'un grand nombre de mesures permettra d'augmenter le rapport signal à bruit. Certains types d'interféromètres proposent cette option, en utilisant des masques de phase permettant d'obtenir simultanément 3 ou 4 images des franges d'interférence avec un décalage de phase adapté. C'est cette méthode qui a été employée pour la caractérisation du miroir de 6,5 m de diamètre du James Webb Space Telescope.

Les analyseurs de type Shack Hartmann remplissent également ce rôle, et ajoutent à cela une grande dynamique de mesure. Le principe repose sur la découpe de la surface en sous-pupilles à l'aide d'une matrice de micro-lentilles. Chaque sous-pupille mesure la pente locale du front d'onde reçu, et permet la reconstruction de la carte de phase totale. Le nombre de points de mesure étant relié au nombre de sous-pupilles, on ne peut mesurer que les fréquences spatiales correspondant au nombre de sous-pupilles sur un diamètre.

La méthode de *stitching* est quant à elle adaptée à la mesure de grandes surfaces planes et convexes, ou bien de surfaces

présentant une grande déviation en regard de la meilleure sphère d'interpolation. Le principe est la mesure de sous-surfaces puis la reconstruction de la surface totale à l'aide d'algorithmes adaptés. Cette méthode est longue à mettre en œuvre et demande un environnement stable, mais donne des résultats très précis. La reconstruction demande cependant d'avoir des zones de recouvrement afin de pouvoir recalculer les sous surfaces entre elles.

Il existe d'autres types d'analyseurs en plan pupille, comme par exemple l'analyseur par interférométrie à décalage latéral (voir par exemple S. Velghe *et al.*, Opt. Lett., 30(3) (2005)), qui permet une prise de vue instantanée, et atteint une grande dynamique de l'ordre de plusieurs centaines de microns de déviation. comme par exemple l'analyseur par interférométrie à décalage latéral (voir par exemple S. Velghe *et al.*, Opt. Lett., 30(3) (2005)), qui permet une prise de vue instantanée, et atteint une grande dynamique de l'ordre de plusieurs centaines de microns de déviation.

Dans le cas des analyseurs en plan focal, l'analyse se fait sur la forme de la tâche focale. Dans le régime des petites perturbations, la méthode de diversité

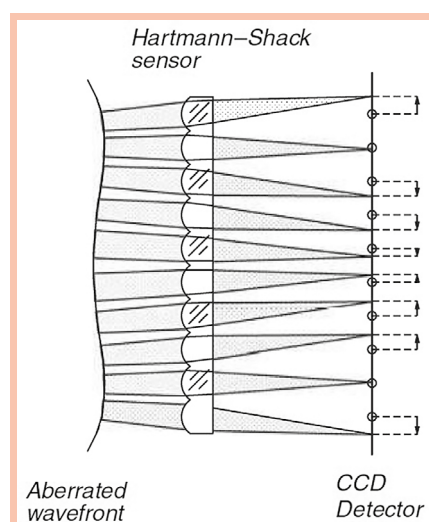
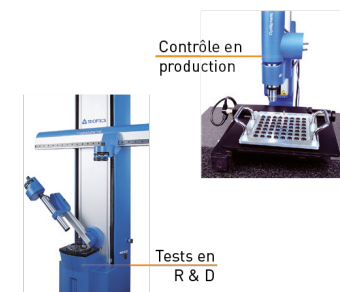
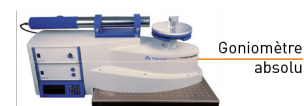
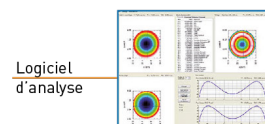
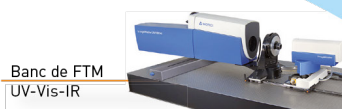


Figure 3. Schéma de fonctionnement d'un analyseur de Shack Hartmann. La subdivision du front d'onde en sous-pupilles permet la mesure des pentes locales et la reconstruction de la carte de phase associée. Ces analyseurs sont robustes et ont une grande dynamique, mais un nombre de points de mesure assez faible en comparaison des interféromètres de Fizeau. (Crédit : Optical Shop Testing, Malacara)



UN UNIVERS DE PRÉCISION

- Solutions complètes pour le test des systèmes optiques
- Interféromètres, goniomètres, collimateurs, autocollimateurs, bancs de tests, bancs de FTM...
- Mesure de focale, centrage, front d'onde, FTM, topographie...
- Applications en R & D et production.
- Développements spéciaux.



TRIOPTICS France
Tél: 04 72 44 02 03
Fax: 04 72 44 05 06
www.trioptics.fr



**INSTITUT
d'OPTIQUE**
GRADUATE SCHOOL
ParisTech

**Continuing
Education**

Formation
Continue

**Formation professionnelle
8 stages autour de la mesure**

Fabrication et contrôle optique - 1/03
Découvrir les étapes de fabrication, apprendre les techniques de contrôle des pièces optiques (3j)

Métrologie visuelle - 13/03
Maîtriser les principes, méthodes et instruments associés aux mesures visuelles (2j)

Mesures de front d'onde - 27/03
Comprendre les principes des mesures de front d'onde et les mettre en pratique sur différents instruments (2j)

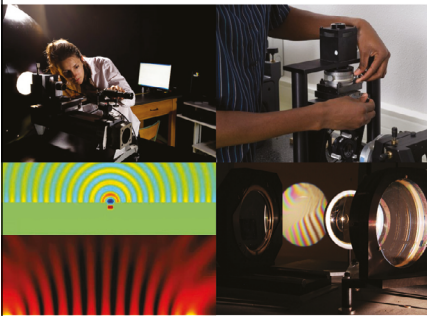
Colorimétrie - 20/04
Comprendre et maîtriser la colorimétrie CIE, manipuler différents types de colorimètres (2j)

Radiométrie et photométrie - 24/04
Savoir choisir et utiliser des appareils de mesure commerciaux, être capable de développer des bancs de test dédiés (5j)

Granulométrie optique - 9/05
Découvrir les techniques et applications de caractérisation de systèmes particuliers en écoulement (1j)

Interférométrie optique - 10/10
Comprendre l'interférométrie optique et son utilisation dans l'industrie (4j)

Holographie : mesure et display 3D - 12/12
Connaître les principes et les champs d'application de l'holographie, réaliser et traiter des hologrammes (4j)



- Formateurs-experts reconnus
- Large couverture des applications
- Nombreux intervenants industriels
- Mise en pratique expérimentale immédiate à l'Institut d'Optique
- Cohérence pédagogique

Contact
emilie.ericher@institutoptique.fr
+33 1 64 53 32 36



fc.institutoptique.fr

de phase donne des résultats très précis, en reconstruisant le front d'onde aberrant à l'aide de deux images plan focal présentant une défocalisation relative. La mise en œuvre requiert des relais optiques de grande qualité, et cette méthode est alors utilisée dans des systèmes optiques complets, et sera moins adaptée à la mesure de surfaces isolées.

Enfin, mesurer des surfaces avec traitement (*coating*) requiert une attention particulière afin d'éviter le phénomène de réflexions parasites qui perturbent la mesure de la surface. Dans le cas des interféromètres, certains modèles proposent de jouer sur la polarisation de deux voies parallèles, afin d'adapter les intensités des faisceaux de mesure et de référence. Les ASO Shack Hartmann sont peu sensibles à ce phénomène.

Conclusion

Le choix de votre analyseur de surface optique dépend fortement de l'application visée (que voulez-vous caractériser)

et de la nature de la surface (que souhaitez-vous mesurer). Les ASO Shack Hartmann sont très robustes et pratiques d'utilisation pour les domaines de basses/moyennes fréquences spatiales, et permettent d'encaisser une grande déviation du front d'onde. Les interféromètres type Fizeau permettent une mesure très précise de surfaces standard, sur une grande plage de fréquences spatiales, et demandent une mise en œuvre soignée. Les Fizeau à mesure instantanée sont particulièrement performants. Les mesures en plan focal seront plus adaptées à des caractérisations de systèmes qu'à des mesures de surfaces isolées.

Enfin, le paramètre majeur de votre choix sera le prix, sujet délicat que je n'ai pas encore abordé. Les Shack Hartmann montent à 30 k€, l'analyse plan focal avoisine les 50 k€, les Fizeau entre 60 k€ et 100 k€ auxquels s'ajoutent les calibres qui sont de l'ordre de 10 k€. Les options de *stitching* font encore monter les prix.

Fournisseur français	Marque	Contact
Brant Industrie	Innowep	Frederick Gheerbrant frederick.gheerbrant@brant-industrie.fr Tél. : 03 20 50 45 53
Haso 4 Vis	Alpao	Vincent Hardy - vincent.hardy@alpao.fr Tél. : 04 76 89 09 65
Trioptics France	Trioptics 4D Technology	Jean-Marc Lioutier - jeanmarc.lioutier@trioptics.fr Tél. : 04 37 47 89 63
Lot-qd	Zygo	Lionel Sudrie - sudrie@lot-qd.fr Tél. : 01 69 19 49 49
KLA Tencor	KLA Tencor	Tél. : 01 78 94 82 00
Scientec	Sensofar Toho Technology	Didier Pellerin - d.pellerin@scientec.fr Tél. : 01 64 53 27 00
Bruker Surface Analysis	Bruker (ex-Wyko ; ex-Veeco)	Grégory Candor - gregory.candor@bruker.com Tél. : 01 72 86 61 00
Fimetrics USA	Filmetrics	Cassandra Flunker - flunker@filmetrics.com Tél. : USA. Californie (858) 573-9300 Tél. : France 33 9 75 18 17 70
Sigatec	ESDI interferometers and softwares	Bruno Berton - sigatec@free.fr Tél. : 06 80 98 71 27
Phasics	SID4	Benoit Wattellier - bw@phasics.fr Tél. : 01 80 75 06 33
Imagine Optic	HASO series	Xavier Levecq - xlevecq@imagine-optic.com Tél. : 01 64 86 15 60
Optoprim	Moeller Wedel	Guillaume Adam - gadam@optoprim.com Tél. : 01 41 90 61 87 Yann Joly - yjoly@optoprim.com Tél. : 01 41 90 33 76
Optophase	Optocraft	info@optophase.com - Tél. : 04 78 74 24 56