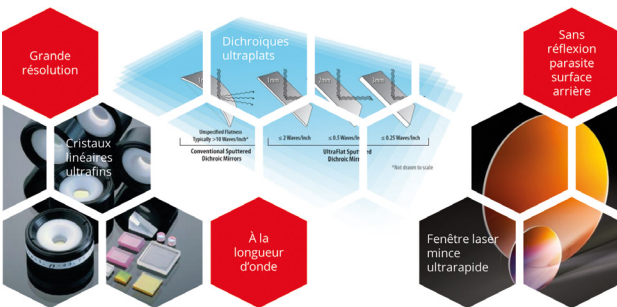


MÉTROLOGIE OPTIQUE DE SURFACES PLANES MULTIPLÉS PAR LA TECHNOLOGIE SHACK HARTMANN

Rafael PORCAR*, Nicolas LEFAUDEUX, Xavier LEVECO

Imagine Optic SA, Orsay, France

*rporcar@imagine-optic.com



<https://doi.org/10.1051/photon/202613634>

L'analyseur de Shack Hartmann s'est imposé comme un outil de métrologie optique pour sa facilité d'utilisation, sa très grande dynamique de mesure, son caractère achromatique et sa versatilité. Une nouvelle implémentation a été proposée récemment pour caractériser de multiples surfaces d'un même échantillon tirant parti de sa capacité à mesurer une combinaison de plusieurs fronts d'onde sans que le signal brut acquis n'en soit compromis, ne générant pas d'interférences. Mieux encore, il s'accommode de sources à toutes longueurs d'onde, et a su évoluer pour augmenter drastiquement sa résolution !

La métrologie sans contact de pièces optiques est primordiale, que ce soit pendant le processus de fabrication, pour l'optimiser, ou une fois la pièce terminée, pour valider sa qualité optique et ses spécifications. Le besoin concerne tant les fabricants que les intégrateurs et utilisateurs de ces composants. Parmi ceux-ci, les pièces à surfaces parallèles nécessitent un effort particulier de mise en œuvre de leur

contrôle, de par leur forme -comme les fenêtres, wafers, écrans de protection - ou leurs propriétés spectrales - cristaux, filtres, dichroïques, lames séparatrices et tout substrat ayant reçu un traitement antireflet ou réfléchissant-.

Le parallélisme des surfaces parallèles fait qu'il est en effet compliqué de séparer le signal provenant d'une surface et de l'autre, créant des artéfacts qui limitent la précision des solutions de métrologie. Par exemple, dans

le cas d'un interféromètre de type Fizeau, un motif d'interférences à 3 ondes se forme qui entrave la reconstruction des données. Les traitements appliqués -ou les matériaux utilisés- peuvent quant à eux rendre compliquée ou impossible la métrologie systématique à la longueur d'onde d'un laser HeNe. Par exemple, mesurer la forme d'une surface d'une optique laser avec un traitement réfléchissant à 800nm se complique lorsqu'elle est transparente à 632.8nm !

Des solutions plus ou moins pratiques et plus ou moins onéreuses ont bien été développées [1]. Ainsi, nombreux sont les lecteurs qui ont appliqué un revêtement -presque une potion secrète- à la surface arrière de leurs échantillons à tester pour éviter que la réflexion de la surface arrière ne vienne perturber leurs mesures. Néanmoins, cela signifie préparer la pièce donc la nettoyer par la suite, ce qui impacte fortement le temps du poste métrologie. De plus, le revêtement peut affecter la forme de la pièce et introduire une erreur de mesure, surtout si elle est fine, et représenter un risque de manipulation de la pièce. D'autres approches travaillent les propriétés de la source, comme sa longueur de cohérence, pour sélectionner les surfaces caractérisées. Elles représentent un réel surcout financier et de manipulation.

Imagine Optic, forte de son expertise en mesure de front d'onde par la technologie de Shack Hartmann a breveté une approche, dénommée POP, qui tire parti de la robustesse de ce principe de mesure. Elle permet de tester facilement et simplement des écrans et des fenêtres, des filtres et des filtres dichroïques ou des cristaux laser. Elle est compatible avec toutes les épaisseurs d'échantillons et s'adapte aux propriétés spectrales des traitements de surface pour qualifier les optiques que ce soit en transmission ou en réflexion.

Ces fonctionnalités sont rendues possibles par l'utilisation combinée de sources de lumière communes de faible longueur de cohérence, à n'importe quelle longueur d'onde et d'un capteur de front d'onde Shack Hartmann haute résolution.

EXPLOITATION DE MESURE DE PLUSIEURS FRONTS D'ONDE MOYENNÉS (COMBINÉS)

La méthode, qui s'applique à des échantillons optiques partiellement transparents à la longueur d'onde de test, est décrite pour un échantillon à faces planes et parallèles. Il est illuminé par un faisceau incident de faible cohérence temporelle, et les faisceaux réfléchis par chacune des faces de l'échantillon, ainsi que le faisceau transmis, sont dirigés vers un analyseur de front d'onde de Shack Hartmann au moyen d'un système optique qui adapte le diamètre de la pupille d'analyse (figure 1 gauche).

Le principe de la méthode est simple : la réalisation de deux mesures (M1 et M2) liant deux inconnues à déterminer -a la déformation de la surface A de l'échantillon et β la déformation de la deuxième

surface B- permet leur détermination par la résolution d'un système d'équations linéaires. L'analyseur de Shack Hartmann est dans ce cas un outil qui s'adapte parfaitement à cette approche car il peut mesurer la combinaison de plusieurs contributions sans qu'elles interfèrent destructivement entre elles, en utilisant une source à faible cohérence temporelle. Chacune des contributions doit simplement être pondérée de son intensité relative.

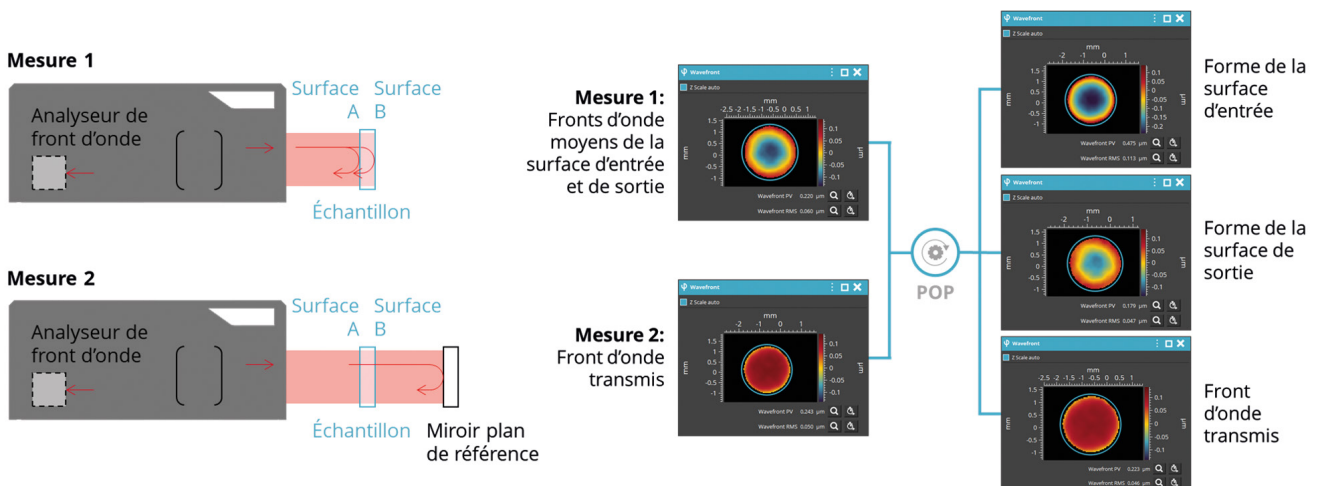
La méthode consiste donc à réaliser tout d'abord la mesure (M1) du front d'onde moyen correspondant à la déformation produite en réflexion par les deux surfaces A et B de l'échantillon :

$$M_1 = \frac{[2\alpha(R_A + R'_B) - 2R'_B n(\alpha - \beta)]}{R_A + R'_B}$$

avec n l'indice de réfraction de l'échantillon. Chaque contribution est pondérée par les coefficients R_A pour la surface A et $R'_B = R_B(1 - R_A)^2 T^2$ pour la face B, avec R_A et R_B la réflectivité des faces A et B respectivement et T la transmission de l'échantillon.

Ensuite, la méthode propose l'acquisition du front d'onde correspondant à la déformation produite ●●●

Figure 1. Gauche : protocole de mesure de la méthode POP. L'échantillon à caractériser est placé et aligné une fois en face d'un système optique composé d'un éclairage et d'un analyseur de front d'onde fonctionnant en double passage. Droite : les algorithmes POP calculent les formes des surfaces de l'échantillon à partir des mesures de front d'onde moyens, et en bonus, la qualité de front d'onde transmis.



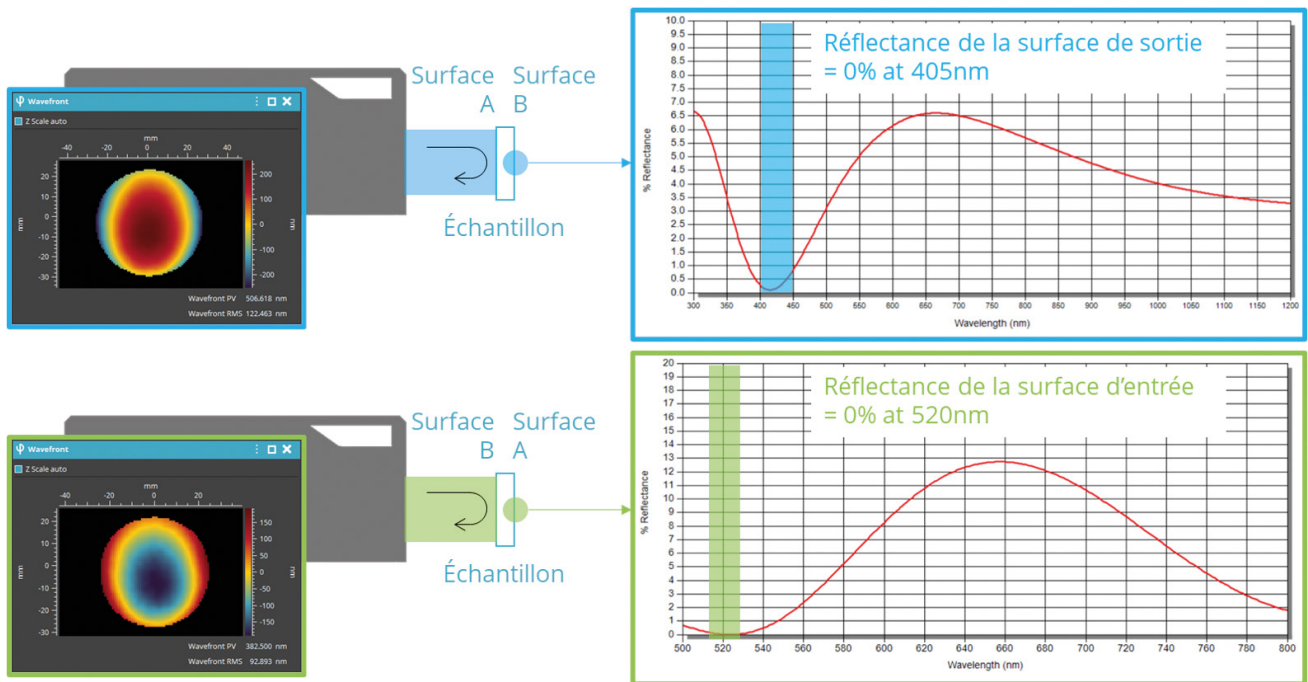


Figure 2. Mesure de la forme des surfaces en réflexion, en s'assurant de ne pas avoir de réflexion parasite provenant de la surface arrière de l'échantillon grâce à la sélection appropriée de la longueur d'onde de test : en haut, mesure à 405 nm, en bas, mesure à 520 nm.

en transmission par les deux surfaces de l'échantillon (M2) :

$$M2 = (n - 1)(\alpha - \beta)$$

Les défauts de forme de surface peuvent alors se déduire des deux mesures réalisées (figure 1 droite) :

$$\alpha = \frac{M_1}{2} - \left(\frac{nR'_B M_2}{2(n-1)(R'_A + R'_B)} \right)$$

$$\beta = \alpha + \left(\frac{M_2}{2(n-1)} \right)$$

La méthode présente plusieurs avantages :

Il n'est pas nécessaire de manipuler et retourner l'échantillon pour accéder aux propriétés de chacune des surfaces, comme le nécessite une mesure optique en réflexion classique, ou une mesure par contact. Il n'est pas non plus nécessaire de préparer l'échantillon, ce qui minimise l'impact de la métrologie dans

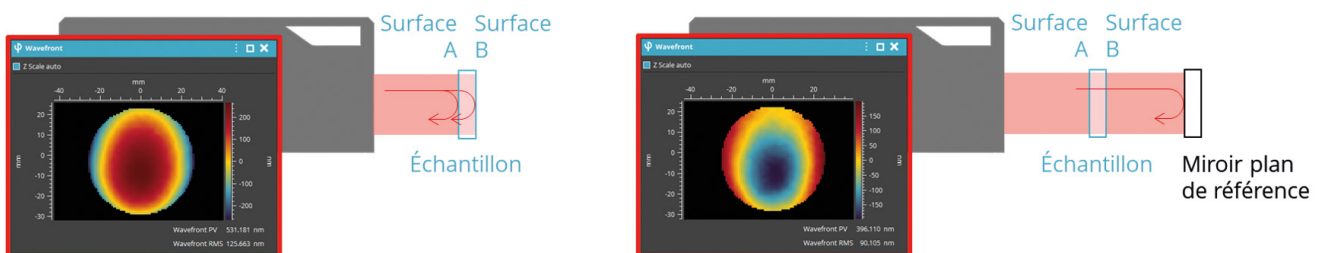
le processus de fabrication ou de contrôle de qualité final, avec un cycle de test complet en moins de 1 minute.

La technique fonctionne à n'importe quelle longueur d'onde : elle s'adapte ainsi parfaitement aux contraintes spectrales imposées par les designs et les pièces à contrôler, de par les propriétés des matériaux ou leur revêtement optique : les pièces peuvent alors être qualifiées aussi après traitement, répondant aux exigences croissantes des applications optiques.

La technique est compatible avec des échantillons extrêmement fins – quelques dizaines de microns – grâce à l'utilisation de sources à faible longueur de cohérence, de type SLED par exemple, très accessibles, économiques et durables. La maintenance périodique de la source utilisée pour la métrologie n'est plus un poste récurrent et onéreux comme dans le cas des solutions basées sur l'interférométrie et des lasers très stables.

La méthode hérite aussi des avantages de la technologie Shack

Figure 3. Mesure de la forme des surfaces en réflexion par la méthode POP.



LA TECHNOLOGIE DE SHACK HARTMANN ET SES AVANTAGES

Un analyseur de Shack Hartmann est un appareil de métrologie compact composé d'une caméra devant laquelle est montée une matrice de microlentille permettant d'échantillonner un faisceau incident. Les caractéristiques de la technologie sont :

TEMPS RÉEL : mesure dynamique de tous les paramètres

ROBUSTESSE : Insensible aux vibrations et aux turbulences atmosphériques

PRÉCISION : Précision standard de $\lambda/100$ RMS

ACHROMATISME : Achromaticité sur toute la gamme spectrale de sensibilité du capteur

FACILITÉ D'UTILISATION : Mesure absolue grâce à l'étalonnage usine

Hartmann, et est robuste aux vibrations. Cela facilite son implémentation dans des environnements habituellement contraignants, au plus proche de la ligne de production, évitant d'avoir à déplacer les échantillons vers le laboratoire de métrologie avec les contraintes que cela implique : impact sur le rendement, risque pour les pièces optiques (fragiles, ou requérant de nombreuses itérations de fabrication) ou encombrants de manipulation (pièces encombrantes, extrêmement lourdes, etc.)

Enfin, la technique est compatible avec des mesures sur de multiples régions d'intérêt simultanées, ce qui permet de contrôler des assemblages : fagots de cristaux, pièces cimentées sur une même cale par exemple avec la même cadence.

DÉMONSTRATIONS ET RÉSULTATS DE MESURES

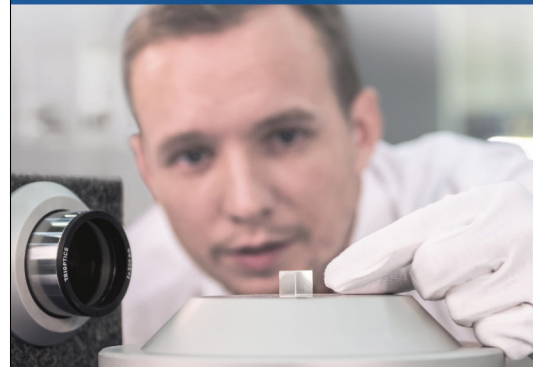
Pour démontrer la justesse de la mesure de surface de forme d'échantillon optique par la méthode POP, un calibre de 40mm de diamètre et 10mm d'épaisseur dont les deux faces ont été traitées a été utilisé. Les caractéristiques de réflectance de chacune des faces sont visibles dans la figure 2. Pour la mesure de front d'onde, l'instrument MESOL [2], équipé avec 4 sources aux longueurs d'onde 405nm, 520nm, 635nm et 850nm a été choisi et, parmi les 5 zooms optiques motorisés qu'il intègre,

réglé sur le diamètre de faisceau de test 2 pouces (50mm).

Pour la mesure de la première surface (A), le calibre est placé en face de l'instrument, aligné *via* l'interface utilisateur et mesuré à 405 nm. Comme la surface de sortie (B) est traitée avec un revêtement antireflet à 405nm, il n'y a pas de signal parasite non désiré généré par la surface B de l'échantillon qui viendrait perturber la mesure. Pour la mesure de la seconde surface (B), le calibre est retourné, réaligné et mesuré à 520 nm. Comme la surface de sortie de cette configuration (A) est, elle, traitée avec un revêtement antireflet à 520 nm, on s'assure à nouveau qu'il n'y a pas de signal parasite non désiré qui viendrait perturber la mesure. Ces deux mesures, faites de manière classique en réflexion, donnent une référence d'erreur de front d'onde à laquelle comparer la mesure.

Le même calibre est maintenant mesuré *via* la méthode POP. Pour cela, le calibre est placé en face de l'instrument et aligné une seule fois : il ne sera pas nécessaire de le retourner pour effectuer les deux mesures présentées dans la section précédente: la première correspondant aux fronts d'ondes combinés des deux surfaces en réflexion, la deuxième correspondant à la mesure en transmission de l'échantillon en double passage. Les algorithmes développés retournent ensuite les

Métrologie des systèmes photoniques



Mesure de la plupart des paramètres d'un système optique

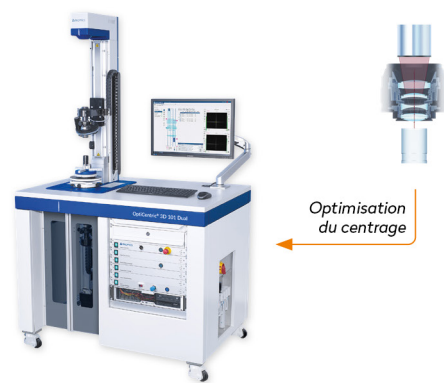
Systèmes imageurs, Lidars, Lasers, Objectifs, AR-VR

Tests en R&D et contrôle en production



Optimisation des alignements CamTest

Station de mesure de la FTM ImageMaster HR2

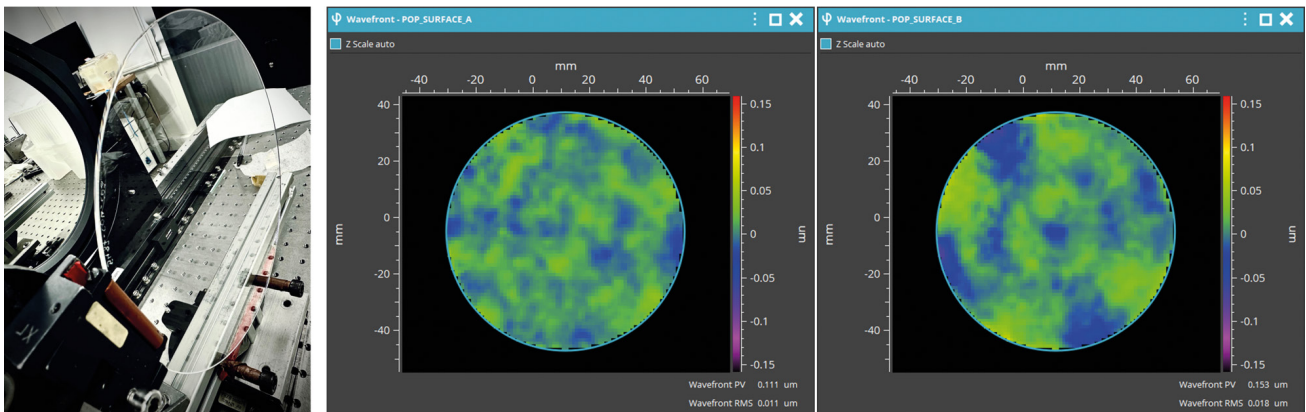


Optimisation du centrage

Station de Centrage OptiCenter 101

TRIOPTICS France

76 rue d'Alsace | 69100 Villeurbanne
Tel. +33 (0)4 72 44 02 03
www.trioptics.fr



deux cartes d'erreur de front d'onde des deux formes de surface. Il est alors possible de les comparer aux mesures précédentes obtenues en réflexion.

Les résultats obtenus sont résumés dans le tableau 1.

On constate que les mesures de forme de surface mesurées sont parfaitement cohérentes : la surface A et la surface B présentent les mêmes erreurs de front d'onde RMS quelle que soit la méthode de test utilisée, à l'erreur près de l'instrument utilisé ($\lambda/100$ RMS).

Résultats annexes : on peut aussi constater que la justesse de mesure est assurée alors que les différentes mesures ont été réalisées à 3 longueurs d'onde différentes, ce qui montre aussi l'achromaticité de l'analyseur de Shack Hartmann. Les cartes de forme de surface visibles dans les figures 2 ou 3 montrent aussi que l'échantillon n'est pas parfaitement plan. La surface A est légèrement convexe, et la B légèrement concave.

La méthode POP peut aussi être appliquée à des échantillons avant traitement, comme par exemple des substrats minces (2 mm) de grand diamètre (200mm) visibles en figure 4, afin de sélectionner la surface de meilleure qualité. Cette surface est celle qui sera traitée avec un revêtement réfléchissant pour laser de haute intensité : la « SURFACE_A » dans le cas présenté. La méthode permet de minimiser les manipulations de l'échantillon qui est délicat, et

Figure 4. Substrat plan caractérisé par la méthode POP (gauche) et les formes de surface mesurées (droite) visualisées hors courbure (sphère) pour sélectionner celle qui sera traitée avec un revêtement réfléchissant.

d'optimiser la qualité optique des miroirs produits.

CONCLUSION

La méthode POP démontre qu'une exploitation innovante de la technologie Shack-Hartmann permet de répondre efficacement aux défis de la métrologie des optiques à surfaces parallèles. En mesurant des fronts d'onde combinés sans interférences à l'aide de sources à faible cohérence, elle autorise la reconstruction simultanée des formes des deux surfaces d'un même échantillon, sans préparation ni retournement, et à toute longueur d'onde.

Les résultats expérimentaux montrent une excellente cohérence

avec des mesures de référence en réflexion, confirmant la justesse et l'achromaticité de l'approche.

Au-delà de la performance métrologique, la méthode développée se distingue par sa rapidité, sa robustesse environnementale et sa compatibilité avec des contextes industriels contraignants. Les perspectives de développement concernent l'extension à des composants de grand diamètre, et la déclinaison de la méthode pour déterminer la variation d'indice de l'échantillon. POP se positionne comme une évolution prometteuse de la métrologie photonique, adaptée aux exigences croissantes de la fabrication optique moderne. ●

Tableau 1. Résultats obtenus.

	MESURE CLASSIQUE EN RÉFLEXION	MESURE NOUVELLE MÉTHODE POP
Surface A	122,5 nm RMS	125,7 nm RMS
Surface B	92,9 nm RMS	90,1 nm RMS

RÉFÉRENCES

- [1] Craig R. Forest, Claude R. Canizares, Daniel R. Neal, Michael McGuirk, and Mark Lee Schattenburg, *Optical Engineering* **43**(3), (2004). <https://doi.org/10.1117/1.1645256>
- [2] MESO, spécifications techniques. <https://www.imagine-optic.com/products/meso-metrology-system/>