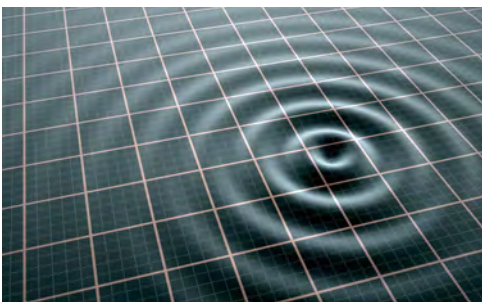


ACHETER UN ANALYSEUR DE FRONT D'ONDE

Benoit WATELLIER

PHASICS, Bâtiment Explorer, Parc Technologique de Saint Aubin, 91190 Saint Aubin

*bw@phasics.fr



Les analyseurs de front d'onde permettent de mesurer l'intensité et la phase de la lumière. Ce sont des instruments de mesure très flexibles qui trouvent leur place autant dans les laboratoires de recherche que dans les chaînes de contrôle de fabrication des optiques. Ils y ouvrent de nouveaux horizons pour des applications sans cesse renouvelées.

<https://doi.org/10.1051/photon/202211751>

Un analyseur de front d'onde est en principe un instrument permettant de mesurer la phase d'un faisceau

lumineux. En réalité, au vu des évolutions techniques, cette définition est restrictive car la plupart des solutions actuelles permettent de mesurer le champ électromagnétique

complexe de la lumière et pas seulement sa phase. Cela signifie qu'il mesure l'intensité, comme une caméra standard, tout autant que la phase de la lumière. Sa ●●●

SPECTROGON

State of the art products

Filtres Interférentiels

De 200 à 15000 nm

- Passe-bande
- Passe-haut
- Passe-bas
- Large bande
- Densité neutre
- Disponible en stock

Réseaux Holographiques

De 150 à 2000 nm

- Compression d'impulsion
- Télécom
- Accordabilité spectrale
- Monochromateurs
- Spectroscopie
- Disponible en stock

UK (parle français): sales.uk@spectrogon.com • Tel +44 1592770000
 Sweden (headquarters): sales.se@spectrogon.com • Tel +46 86382800
 US: sales.us@spectrogon.com • Tel +1 9733311191

www.spectrogon.com

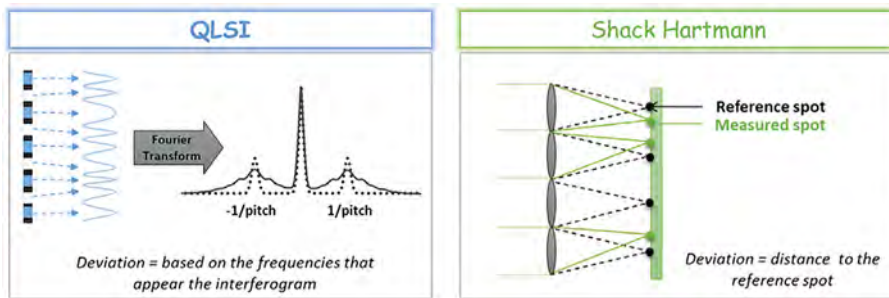


Figure 1. Schéma de principe des deux technologies QLSI et Shack Hartmann.

particularité par rapport aux interféromètres abondamment utilisés pour mesurer des effets de phase, est une mesure directe du champ alors que ceux-ci ne sont capables que de mesurer une différence de phase par rapport à une référence. De ce fait, les analyseurs de front d'onde sont dits auto-référencés, ce qui signifie qu'ils n'ont pas besoin d'une référence externe pour fonctionner. Comme ils n'ont pas besoin d'une source interne, un appareil fonctionne sur une gamme de longueur d'onde étendue. Ce sont des systèmes dont la taille est proche de celle d'une caméra. Ils sont donc facilement intégrables dans des expériences ou des systèmes de métrologie très encombrés (spatial) ou pour mesurer des objets de très petite taille. De par leur compacité, ils sont aussi très peu sensibles aux vibrations ce qui permet le déploiement de la métrologie optique de précision dans des environnements industriels habituellement interdits à l'optique. On voit donc que la force des analyseurs de front d'onde réside dans leur flexibilité.

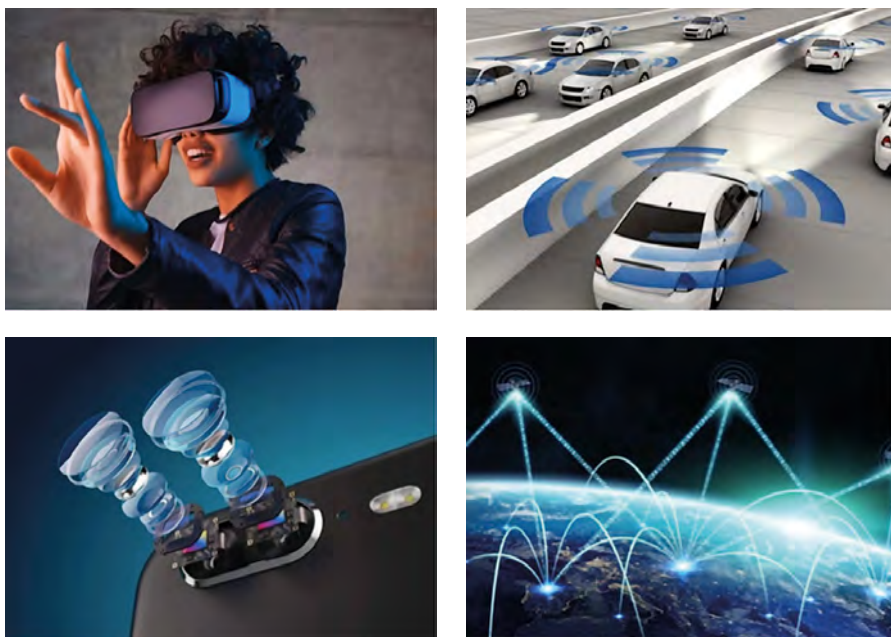
TYPES D'ANALYSEURS

Il existe un grand nombre de techniques d'analyse de front d'onde. Comme la phase ne peut pas être mesurée directement en raison de l'ordre de grandeur des retards de phase de quelques femtosecondes, elle est révélée en observant ses effets lors de la propagation. Certaines techniques vont chercher à déduire le champ électromagnétique à partir de plusieurs mesures d'intensité dans plusieurs plans le

long de la propagation. Comme l'équation à résoudre est non-linéaire, le problème mathématique est complexe à résoudre et le résultat sensible au bruit. En faisant des approximations, le problème peut être linéarisé au prix d'une réduction de la dynamique de mesure. Certaines techniques cherchent à créer une référence avec le faisceau lui-même (radial shearing, SLIM) en dédoublant le faisceau, filtrant une partie et la faisant interférer avec l'autre. On obtient la phase directement, souvent au prix d'un

filtrage spatial sur les images obtenues (halos). De plus, l'utilisation d'un filtrage spatial rend l'instrument très sensible à l'alignement et son intégration parfois complexe. Enfin, on peut se baser sur le fait que les surfaces équiphasées (i.e. les fronts d'onde) sont perpendiculaires au vecteur d'onde local, c'est-à-dire la direction locale de propagation : le vecteur d'onde est égal à l'opposé du gradient de la phase. Ainsi, si la lumière passe à travers une grille périodique, la projection de cette grille dans un plan distant de quelques millimètres sera une grille déformée dont la déformation est proportionnelle aux dérivées de la phase. Ce principe est utilisé dans le test de Hartmann et de Shack-Hartmann. Pour le premier, on utilise une grille de trous dont l'espacement est connu. Dans le second, la figure périodique est générée par une matrice régulière de micro-lentilles dont l'intérêt principal est de concentrer la lumière sur le capteur de l'instrument. A la fin des années 1990, Jérôme Primot de l'ONERA a repensé la grille de

Figure 2. Domaines d'applications de l'imagerie de phase. Réalité Virtuelle/Réalité Augmentée, Système avancé d'aide à la conduite ADAS, Smartphone, Communications optiques en espace libre.



Hartmann comme une modulation périodique de l'intensité, qui peut donc être modélisée comme une optique diffractive. A partir de ce constat, il a revu la méthode d'analyse du signal enregistré sur la caméra de l'instrument en utilisant des techniques basées sur l'analyse de Fourier, bien adaptée à la déformation de fonctions périodiques. Il a surtout déterminé une grille optimale pour faire de l'analyse de surface d'onde qui a une transmittance sinusoidale. Il a enfin conçu son approximation industriellement réalisable : le masque de Hartmann modifié. Cela a conduit à l'introduction de l'interférométrie à décalage quadrilatéral (QLSI, pour Quadriwave Lateral Shearing Interferometry). Dans les années 2000, il a montré que les techniques de Hartmann, Shack-Hartmann et du QLSI sont toutes les trois basées sur le même principe, qui est l'interférométrie à décalage multi-latéral (MLSI, multi-lateral shearing interferometry) qui comprend toutes les techniques déduisant la phase à partir de la déformation d'une grille régulière. Les instruments basés sur ces techniques comportent un élément modulateur d'intensité et une caméra placée à quelques millimètres de celui-ci. Leur utilisation est simple car ce sont des systèmes compacts et rigides mécaniquement, ce qui fait qu'ils peuvent être utilisés un peu partout. Le savoir-faire des fabricants de tels instruments réside en grande partie dans les capacités d'assemblage robuste et d'étalonnage de l'instrument. De nos jours, l'immense majorité des analyseurs de front d'onde disponibles commercialement sont basés sur ces techniques de modulation d'intensité que sont le Shack-Hartmann ou le QLSI.

PARAMÈTRES DE CHOIX

Les analyseurs de front d'onde sont des instruments de métrologie. Ainsi les performances les plus importantes sont les performances métrologiques sur la mesure de la phase. Celles-ci sont :

- **sa résolution en phase** : le bruit instrumental. Il est souvent de l'ordre de quelques nanomètres.

- **sa justesse** : le biais de mesure. Elle est souvent de l'ordre de la dizaine de nanomètres et dépend de la qualité de la référence utilisée pour étalonner l'instrument. La plupart des systèmes commerciaux permettent à l'utilisateur de ré-étalonner lui-même son appareil, notamment pour tenir compte d'un défaut connu de son expérience.

- **sa dynamique** : amplitude de la phase pour laquelle la résolution et la justesse sont maintenues. Elle est souvent de plusieurs centaines de microns. Il est à noter que pour ces dynamiques, la justesse de mesurage est limitée par la méthode de mesure et d'alignement car la phase varie alors très rapidement au cours de la propagation.

Le nombre de points de mesure est aussi important car s'il est grand, on pourra voir des défauts locaux et utiliser l'analyseur de front d'onde comme une caméra de phase et ainsi faire de l'imagerie de phase quantitative. Un grand nombre de points permet également une grande flexibilité sur la taille des faisceaux ou des objets observés. La taille du capteur peut être déterminante si l'on veut mesurer sans intermédiaire des faisceaux de tailles importantes. Cependant, la taille est bien souvent limitée par la taille des capteurs des caméras, qui dépassent rarement 15 mm à des prix raisonnables. Une alternative moins coûteuse est l'adjonction d'un réducteur/agrandisseur de faisceau, souvent proposé comme accessoire standard par les fabricants d'analyseurs de surface d'onde.

La vitesse d'acquisition de la caméra de l'analyseur est importante si l'on veut étudier des phénomènes rapides. Pour les phénomènes ultracourts comme les impulsions lasers nanosecondes ou plus courtes, il faut vérifier avec le constructeur que les caméras fonctionnent en mode « Global Shutter » et pas « Rolling Shutter ». Dans ce mode, tous les pixels sont exposés en même temps alors que dans le mode « Rolling Shutter », souvent utilisé pour les caméras CMOS, ils sont exposés ligne par ligne.



De 0.9 à 14 μm, l'analyse de front d'onde infrarouge haute résolution

Les technologies en infrarouge sont aujourd'hui omniprésentes dans de nombreux domaines, et leur essor est poussé par de nouvelles applications de la vie quotidienne, par les besoins industriels ainsi que par la recherche fondamentale :

- **les télécommunications en espace libre** reposent sur des faisceaux à 1.55 μm parfaitement collimatés ;
- **les véhicules autonomes / ADAS**, dont la sécurité est garantie par la précision des caméras et LiDAR fonctionnant dans l'infrarouge ;
- **la défense et l'aérospatial**, qui exploitent de nombreuses bandes du proche (900 nm) au lointain (14μm) infrarouge ;



PHASICS confirme sa position de leader des solutions de métrologie infrarouge en proposant la gamme la plus complète d'analyseurs de front d'onde, couvrant toute la gamme de 0.9 à 14 μm. Les SID4-SWIR et SWIR-HR, sont les analyseurs les plus sensibles et les plus précis dans le proche IR (0.9-1.7 μm). Le SID4-SWIR-HR propose la plus haute résolution spatiale du marché grâce à ses 160 × 128 pixels de phase.

Le SID4 DWIR couvre les bandes moyen IR (3-5 μm) et lointain IR (8-14 μm) avec une très haute résolution spatiale de 160 × 120 points, permettant une caractérisation fine des lasers CO₂, corps noirs, et optiques en infrarouge. ●

PHASICS

Tel: +33 (0) 1 80 75 06 33

contact@phasics.com

www.phasics.com

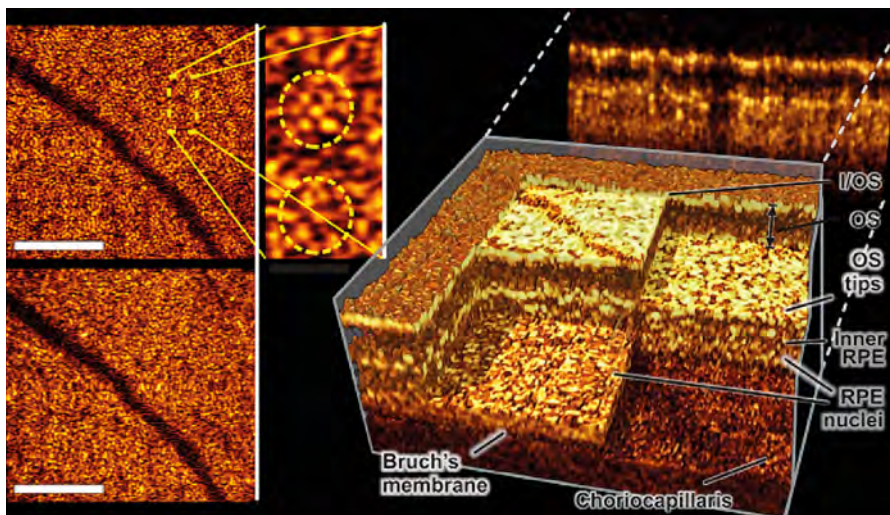


Figure 3. Amélioration des images microscopiques (©Imagine Optic)

Lorsqu'on veut utiliser un analyseur de surface d'onde pour aligner une expérience ou un système optique, il est important que la mesure se fasse en temps réel, c'est-à-dire dans l'idéal à mieux que 20 images par seconde. Dans la pratique, 10 images par seconde sont compatibles avec le temps de réaction d'un être humain opticien. Or, le recouvrement du champ électromagnétique à partir des images enregistrées par la caméra est souvent le fruit d'un calcul complexe, surtout si le fabricant prend soin de mettre des systèmes de détection et de correction des erreurs de mesure. Il est donc important de vérifier que l'instrument proposé donne les images à la résolution spatiale indiquée avec une fréquence temporelle suffisante pour une utilisation en temps réel.

APPLICATIONS

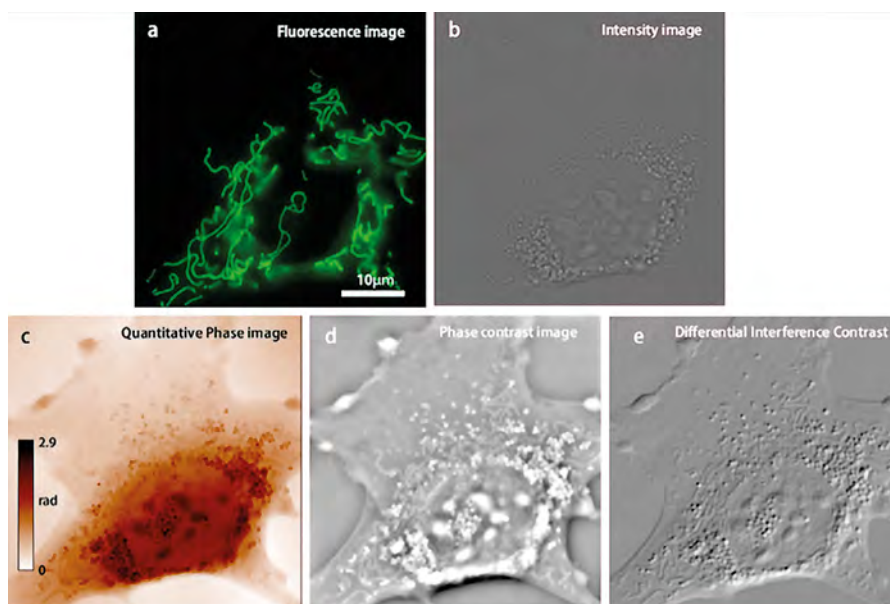
Ce qui fait le succès actuel des analyseurs de surface d'onde est la multiplicité des domaines pour lesquels ils peuvent être appliqués, du fait de leur grande flexibilité en termes d'intégration et de source lumineuse. Ils étaient utilisés dans les années 1990 uniquement dans le domaine de la métrologie optique. Puis ils sont devenus indispensables pour la métrologie des lasers et l'optique adaptative, qui a permis d'en augmenter l'intensité sur cible. A

partir des années 2000, de nouvelles applications sont apparues dans le domaine de l'imagerie pour la biologie et les matériaux. Dans certains cas, ce sont des alternatives à l'interférométrie et ils remplacent des Mach-Zender ou des Michelson. Parfois, ils permettent des mesures jusqu'alors impossibles.

DOMAINES D'APPLICATION
Métrologie optique (double et simple passage, multi-longueur d'onde) ; MTF ; EFL etc...

L'application historique de l'analyse de surface d'onde est la métrologie des optiques. C'est pour caractériser des miroirs de télescopes que Hartmann a inventé la technique qui porte son nom et qui a été améliorée par Shack plus tard. Le principe de mesure est souvent le même. Une source de lumière étalonnée traverse un échantillon à caractériser et on observe l'effet de cet échantillon sur le front d'onde transmis. On en déduit l'erreur de front d'onde du système optique (WFE, pour Wave Front Error ou TWE, Transmitted Wave Front Error). Celui-ci est souvent spécifié en WFE et la mesure sert à vérifier sa conformité. Mais on peut aussi l'interpréter pour rétroagir sur l'alignement du système, en projetant la carte de phase sur les polynômes de Zernike. Par exemple, la présence de coma est souvent le signe du décentrement

Figure 4. Cellules vivantes (fibroblastes d'embryons de souris) observées en (a) fluorescence (marquage des mitochondries), (b) fond clair, (c) phase quantitative, (d) contraste de phase (simulé d'après (c)), et (e) Nomarski-DIC (simulé d'après (c)). Images reproduites avec la permission de ACS P. Bon, L. Cognet, ACS Photonics 9,2538 (2022).



d'un des composants du système. L'intérêt de l'analyseur de front d'onde est ici sa flexibilité d'alignement. Ces mesures peuvent se faire en double-passage en suivant un protocole similaire à celui utilisé avec un interféromètre de Fizeau. L'intérêt de l'analyseur de front d'onde est ici qu'il est facile d'adapter la longueur d'onde de mesure au système caractérisé, alors qu'il faut reconstruire complètement un interféromètre quand on change de longueur d'onde. L'analyseur de front d'onde a aussi comme avantage de pouvoir mesurer des fronts d'onde de dynamique de plusieurs dizaines de microns, voire plusieurs centaines de microns. Ainsi la mesure d'optiques asphériques est rendue possible sans hologramme de compensation (CGH, Computer Generated Holograms). Là où l'analyse de surface d'onde prend tout son intérêt, c'est dans la mesure en transmission et en simple passage de systèmes optiques. Celle-ci est quasiment impossible à réaliser avec un interféromètre. Elle garantit une justesse de mesure meilleure car aucun élément optique n'est inséré entre l'objet d'analyse et l'instrument.

Les analyseurs de surface d'onde sont ainsi déclinés sous forme d'instruments seuls. Des accessoires sont proposés pour construire rapidement un banc de mesure avec des performances métrologiques proches d'un interféromètre. Des instruments de mesure incluant des analyseurs de surface d'onde sont aussi disponibles pour les utilisateurs ne disposant pas de compétences spécifiques en métrologie optique ou ne voulant pas mobiliser ces compétences pour la mise en place de protocoles métrologiques.

Optique adaptative et lasers

L'un des domaines de prédilection des analyseurs de front d'onde est la métrologie des faisceaux lasers et leur correction par des méthodes d'optique adaptative. Comme il est possible de connaître le champ électromagnétique dans un plan, on peut prédire sa propagation future ou antérieure. De cette façon, on peut simuler la forme de la tache de focalisation (champ lointain) mais aussi estimer les paramètres du faisceau dont le M^2 , la position et la taille du waist. L'avantage des analyseurs de surface d'onde est que cette mesure est faite en une seule acquisition et permet donc de caractériser des lasers impulsionsnels ou d'étudier la dynamique de faisceaux continus.

Même s'ils sont capables de révéler des aberrations d'ordres élevés, ce sont des outils simples, fiables et précis pour le suivi du tilt des lasers et le contrôle de la collimation.

Imagerie biologique : contraste, mesures, masse sèche, suivi du métabolisme

Comme évoqué plus haut, lorsque le nombre de points de mesure est suffisant, un analyseur de surface d'onde devient une caméra de phase. En microscopie, cette imagerie de phase est dite quantitative, en comparaison avec les méthodes de contraste de phase non quantitatives comme le DIC ou le contraste de Zernike. Elle produit des images contrastées sans marquage. Ceci réduit les étapes de préparation des ●●●



YOKOGAWA 

**NOUVEAUX
MODULES OTR**

Réflectomètre optique
AQ7280

R&D et Production

Norme IEC 60793-1-40

AQ7286	A	1310 42	1550 40	
	H	1310 42	1550 40	1625 39
	J	1310 42	1550 40	1625 39

Distribué par Wavetel :  En savoir plus : 

www.wavetel.fr
sales@wavetel.fr

Acteur de la performance des infrastructures et des applications : Optique, Télécoms, Réseaux, Cybersécurité

Effective-Refractive-index metasurface

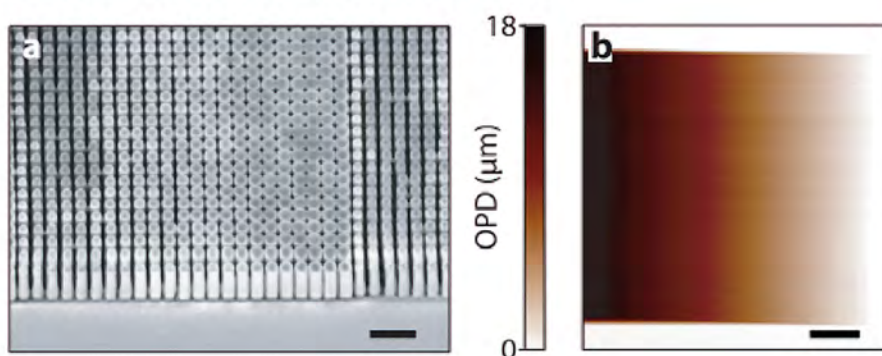


Figure 5. Imagerie de phase d’une métasurface. Image en microscopie électronique de la métasurface (a). Différence de phase mesurée par caméra de phase.

Images reproduites avec la permission de ACS, S. Khadir et al., ACS Photonics 8, 603 (2021).

échantillons et permet l’observation de cellules et de tissus rapidement après leur prélèvement. Les cellules observées peuvent même être réimplantées car elles n’ont pas été modifiées pour par exemple devenir fluorescentes. Comme les images de phase ne sont pas uniquement constituées de niveaux de gris, l’information qu’elles contiennent peut être exploitée pour faire des études statistiques ou pour réaliser du traitement d’images, comme des filtres fréquentiels.

Une application phare est par exemple le suivi du métabolisme des cellules. En effet, on peut montrer que la somme des valeurs de phase mesurées dans une cellule est proportionnelle à la masse sèche de celle-ci. En observant les cellules, on peut donc les peser en temps réel. Cela apporte des perspectives incroyables pour le screening de médicaments : certaines équipes sont capables de déterminer l’efficacité d’un traitement contre le cancer en quelques heures en regardant la réponse métabolique des cellules à différentes drogues. Enfin, l’analyse de front d’onde est maintenant communément utilisée grâce à l’optique adaptative pour

améliorer les performances d’imagerie des microscopes en termes de résolution et de sensibilité.

Analyse de matériaux micrométriques : guides d’onde, métasurfaces, polarisabilité, température (analyse par modèle)

Mais l’imagerie de phase quantitative s’applique également à la science des matériaux pour laquelle les analyseurs de surface d’onde se révèlent des outils indispensables. Comme la phase est reliée au chemin optique parcouru par la lumière, elle transporte tout l’historique de l’indice des milieux traversés lors de la propagation. Si l’on place un objet transparent dans un faisceau lumineux dirigé vers un analyseur de surface d’onde, on peut remonter à ses propriétés optiques. Si l’on connaît les symétries géométriques du milieu, on peut remonter numériquement à la valeur de l’indice et de la densité du milieu. Ceci est appliqué aux jets de gaz, plasma ou à la caractérisation des écoulements en soufflerie. Si l’on ne

connaît pas la symétrie du système, on peut réaliser des mesures tomographiques et retrouver la répartition 3D de l’indice par des méthodes d’holographie diffractive. En modélisant le comportement thermique d’un milieu, on peut remonter à la répartition de l’échauffement d’une surface en mesurant la phase accumulée lors de la propagation dans le milieu chauffé. Enfin, on peut utiliser l’effet Kerr (l’indice est modifié instantanément par l’intensité du faisceau qui traverse le milieu) pour faire des instantanés de faisceaux ultra-courts : une impulsion se déplace dans un morceau de verre et un faisceau sonde ultra-court se propage perpendiculairement à celle-ci. L’image de phase obtenue est une trace de là où se trouvait l’impulsion au moment du passage de l’impulsion sonde.

CONCLUSION

Les analyseurs de front d’onde sont des instruments de haute précision permettant de caractériser un grand nombre de phénomènes optiques. Ils ne sont plus uniquement utilisés comme des suppléments bon marché aux interféromètres mais donnent accès à des applications nouvelles dont la liste s’allonge continûment. Leur utilisation n’est plus limitée à des experts de la métrologie notamment parce que les fabricants proposent des systèmes métrologiquement fiables mais surtout suffisamment robustes pour être utilisés dans des conditions expérimentales très diverses. Enfin, les logiciels proposent des modules d’interprétation bien adaptés aux différents métiers. ●

FOURNISSEURS FRANÇAIS	SITE INTERNET
Alpao	www.alpao.com
Imagine Optic	www.imagine-optic.com
Phasics	www.phasics.com
Thorlabs France	www.thorlabs.com
Trioptics France	www.trioptics.fr