

# MICROSCOPE OPTIQUE À RÉOLUTION NANOMÉTRIQUE POUR LA TEXTURATION DE SURFACE PAR LASER DE MATÉRIAUX DE GRANDES DIMENSIONS

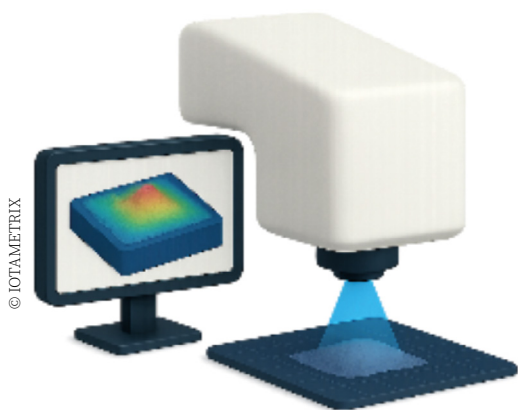
Guillaume MACHINET<sup>1,\*</sup>, Alberto AGUILAR<sup>2</sup>, Pierre BON<sup>2,3</sup>, Aurélien SIKORA<sup>1</sup>,  
Girolamo MINCUZZI<sup>1</sup>, Laura GEMINI<sup>1</sup>, Marc FAUCON<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ALPhANOV, Institut Optique d'Aquitaine, Talence, France

<sup>2</sup>Iotamatrix, Ester Technopole, France

<sup>3</sup>XLIM, Université de Limoges, France

\*guillaume.machinet@alphanov.com



La texturation de surface par laser à impulsions ultrabrèves révolutionne la fonctionnalisation de surfaces des matériaux métalliques, composites ou transparents sans produit chimique, offrant une alternative plus durable aux traitements traditionnels. Pour industrialiser ces procédés permettant d'améliorer les propriétés des surfaces sur de grandes pièces, une métrologie optique ultra-haute résolution en temps réel est cruciale : elle permet de contrôler la géométrie des micro et nanostructures (rugosité, périodicité) et d'ajuster dynamiquement les paramètres laser (fluence, vitesse).

<https://doi.org/10.1051/photon/202613639>

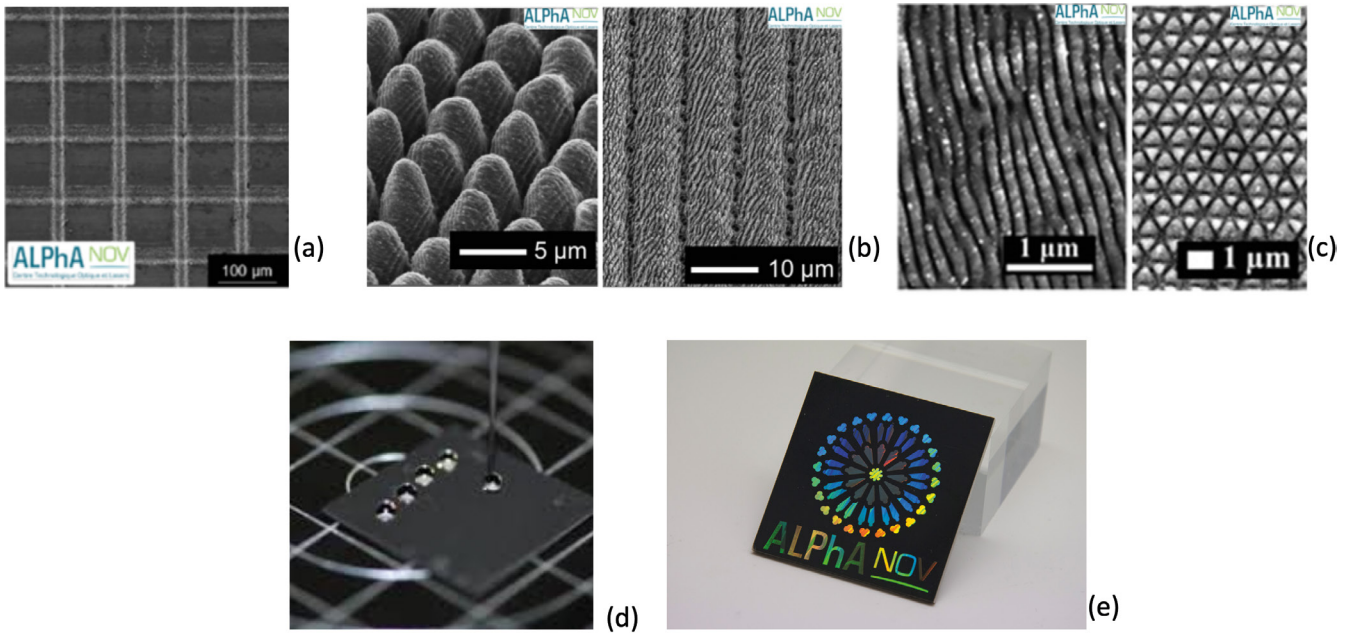
**LA TEXTURATION DE SURFACE  
PAR LASER FEMTOSECONDE,  
UNE ALTERNATIVE À L'USAGE  
DE PRODUITS CHIMIQUES  
SUR LES MATÉRIAUX DE  
GRANDES DIMENSIONS**

La texturation de surface par laser ultracourt est une technique qui utilise

des impulsions laser ultrabrèves dont la durée est inférieure à la dizaine de picoseconde pour modifier la structure des surfaces des matériaux à traiter sans utiliser de produit chimique. Elle réduit ainsi considérablement les risques environnementaux, tout en répondant aux objectifs

de développement durable, et offre une grande diversité d'applications.

Grâce à l'augmentation significative de la puissance des lasers à impulsions ultracourtes au cours des dix dernières années, ceux-ci ont suscité un vif intérêt comme outil de texturation de surface. ●●●



**Figure 1.** En haut, les différentes techniques de texturations de surface par laser femtoseconde. De gauche à droite : la gravure directe pour des résolutions supérieures à la dizaine de microns (a), le DLIP pour des échelles de l'ordre de quelques µm (b) et le LIPSS avec des résolutions dans la centaine de nanomètres (c). En bas, exemple de cas applicatifs de surfaces texturées par laser : surface hydrophobe (d), coloration structurelle d'une surface métallique (e).

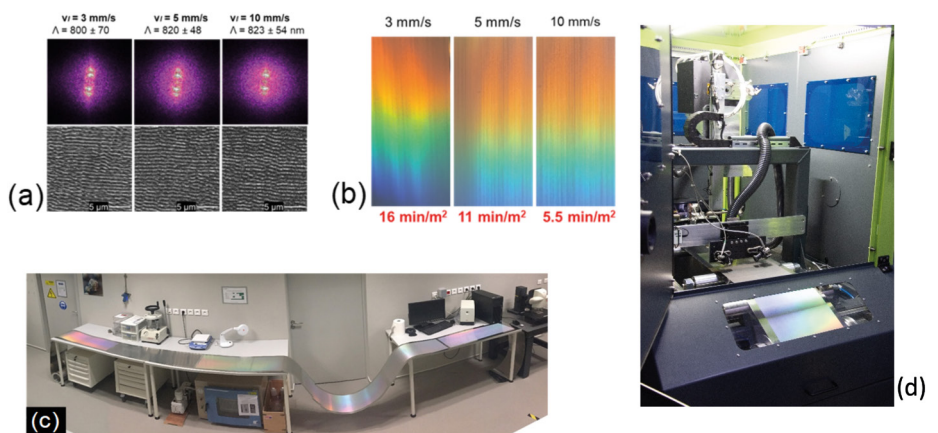
Cette technique permet de réaliser des structures dont la taille varie de quelques centaines de nanomètres à quelques centaines de microns, et ce, sur de grandes surfaces et avec un débit adapté aux besoins industriels (Figure 1). Comme abordé lors d'une précédente édition (Numéro 87, Juillet-Août 2017 <https://doi.org/10.1051/photon/20178744>), diverses fonctionnalisations de surface clés ont été démontrées, la propriété spécifique étant souvent associée à la génération d'une morphologie de surface particulière inspirée bien souvent de la nature (biomimétisme) [1-2] :

- La **peau de requin**, reproduite par des micro-rainures alignées (50 à 200 µm de large), est utilisée pour sa capacité à réduire l'adhésion des biofilms. Cette structure limite également les forces de frottement et son déploiement sur des ailes d'avions permettrait de réduire la traînée hydrodynamique et ainsi la consommation en kérozène jusqu'à 2-3 % [3].
- La **feuille de lotus**, caractérisée par des nanostructures hiérarchiques (piliers de 5 à 10 µm recouverts de rugosités de taille nanométrique), confère aux surfaces une super-hydrophobie extrême (angles de

contact supérieurs à 150°) et un effet auto-nettoyant. Ces propriétés sont exploitées dans les revêtements de panneaux solaires, les textiles techniques ou les surfaces extérieures pour éviter l'accumulation de saletés ou d'eau.

- Les **pattes de gecko**, imitées par des micro-piliers flexibles (100 nm à 2 µm de diamètre), offrent une adhésion réversible sans colle. Ce principe est utilisé en robotique pour des systèmes de préhension ou dans le développement d'adhésifs

**Figure 2.** Réalisation d'une surface antibactérienne sur plusieurs mètres de longueur en procédé "Roll-to-roll" dans le cadre du projet Newskin [2]. (a) : Surface LIPSS réalisée en imagerie MEB. (b) Visualisation en imagerie optique conventionnelle grand champ. (c) : Echantillon d'inox de 15m de longueur texturé par laser avec un temps de 15mn/m<sup>2</sup> (d) Plateforme Roll-to-roll à ALPhANOV.



secs réutilisables, combinant résistance et propreté.

- Les **ailes de papillon**, avec leurs nanostructures périodiques (200–300 nm), inspirent des surfaces aux couleurs structurelles (sans pigment). Ces motifs sont particulièrement utiles dans les capteurs optiques ou les dispositifs esthétiques où la durabilité des couleurs et la résistance à l'humidité sont critiques.

En fonction de la dimension des motifs recherchés et de la vitesse du procédé associé, différentes techniques de texturation laser ont été développées au cours des dernières décennies :

- La première technique est le Direct Laser Writing (DLW). Les structures sont générées par ablation de matière et leur taille est limitée par la taille du spot laser minimale atteignable sur le matériau, soit quelques microns. Le motif réalisé quant à lui est plutôt à l'échelle de la centaine de microns (Figure 1.a et Figure 1.d).
- Dans le cas d'une structuration de la matière avec un motif répété à l'échelle de quelques dizaines de microns, on utilise le Direct Laser Interference Patterning (DLIP), qui est une technique de texturation de surface qui exploite l'interférence de plusieurs faisceaux laser pour

créer des motifs périodiques. Cette méthode permet de structurer rapidement de grandes surfaces avec une précision et une répétabilité élevées, en ajustant l'angle et la longueur d'onde des faisceaux pour contrôler la périodicité des motifs (Figure 1.b).

- Enfin pour des dimensions entre petites à l'échelle de la centaine de nanomètres, la technique Laser-Induced Periodic Surface Structures (LIPSS) est privilégiée. Des nanostructures périodiques (ondulations ou stries) se forment spontanément sur un matériau sous irradiation laser (généralement femtoseconde ou picoseconde) à des fluences proches du seuil d'ablation. Ces ondulations résultent principalement d'un auto-arrangement du matériau suite à l'interaction des polaritons de plasmons de surface avec les impulsions laser (Figure 1.c et Figure 1.e).

Historiquement, les procédés de texturation de surface par laser ultracourt se limitaient à des objets ayant des dimensions de quelques centimètres carrés. Cette restriction était principalement due aux contraintes inhérentes aux systèmes optique utilisés :

- Le champ optique limité des scanners,

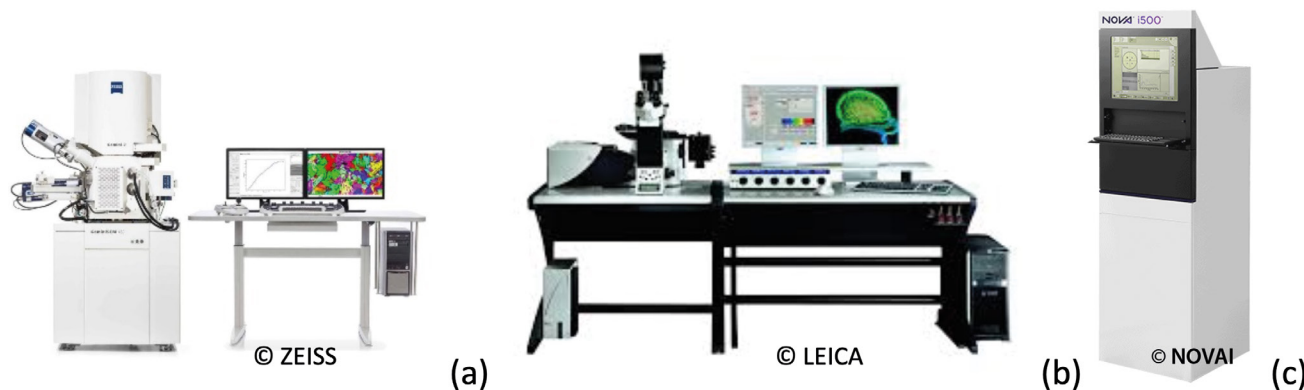
- La puissance moyenne des lasers à impulsions brèves < 10 W,
- La difficulté de synchroniser de manière précise le laser, le scanner et les platines de translation, afin d'assurer un traitement sans chevauchement et à haut débit (procédé laser plus communément appelé *Infinite Field Of View* ou IFoV).

Ces limitations posent un défi majeur pour l'industrialisation de ces procédés, notamment pour des applications nécessitant le traitement de surfaces de grandes dimensions. En effet, des secteurs tels que l'aéronautique, l'automobile ou l'énergie exigent des solutions capables de couvrir des surfaces de plusieurs mètres carrés, tout en garantissant une homogénéité et une reproductibilité des propriétés fonctionnelles.

Les progrès technologiques récents, illustrés par les travaux menés par ALPhANOV dans le cadre du projet européen *Newskin* [2], ont permis de surmonter ces obstacles (Figure 2). Cependant, cette avancée s'accompagne d'un besoin accru de caractérisation fine des matériaux traités, afin de :

- Valider l'homogénéité des motifs sur l'ensemble de la surface,
- Garantir les propriétés fonctionnelles (super-hydrophobie, réduction de la réflexion lumineuse, activité antimicrobienne, etc.) à l'échelle industrielle,
- Optimiser les paramètres de traitement pour assurer la reproductibilité et la fiabilité des procédés.

**Figure 3.** Figure 3 : Equipement usuel pour la métrologie optique des surfaces texturées par laser femtosecondes : (a) : Exemple MEB commercialisé par ZEISS, Microscope confocal de la société LEICA (b) et Scatterrométrie optique développée par NOVAI (c).



TECHNOLOGIE	RÉSOLUTION LATÉRALE	RÉSOLUTION AXIALE	PRÉPARATION DE SURFACE / TYPE ÉCHANTILLON	VITESSE DE BALAYAGE	NATURE DE LA MESURE
MEB	0,5-5 nm	<0,1 nm	Lourde (vide, métallisation)	Quelques minutes	Directe (Électronique)
Scatterométrie	< 1 nm	<0,1 nm	Aucune mais limité à des structures périodiques	Élevée (> 1 kHz)	Indirecte (Diffusion et diffraction + analyse base de données)
OCT	1-2 $\mu\text{m}$	1-10 $\mu\text{m}$	Aucune	Élevée (> 1 kHz)	Directe (Interférométrie)
ix01 : CRM à réallocation de photons	~ 100 nm	~10 nm	Aucune	Élevée (> 1 kHz)	Directe (Optique, sans préparation)

Ainsi, le développement de méthodes de caractérisation adaptées aux grandes surfaces devient un enjeu clé pour l'industrialisation de ces technologies. Ces méthodes doivent permettre une analyse rapide, non destructive et précise, afin de répondre aux exigences des applications industrielles.

### LA MÉTROLOGIE OPTIQUE, UNE NÉCESSITE POUR QUALIFIER LA FONCTIONNALISATION RÉALISÉE

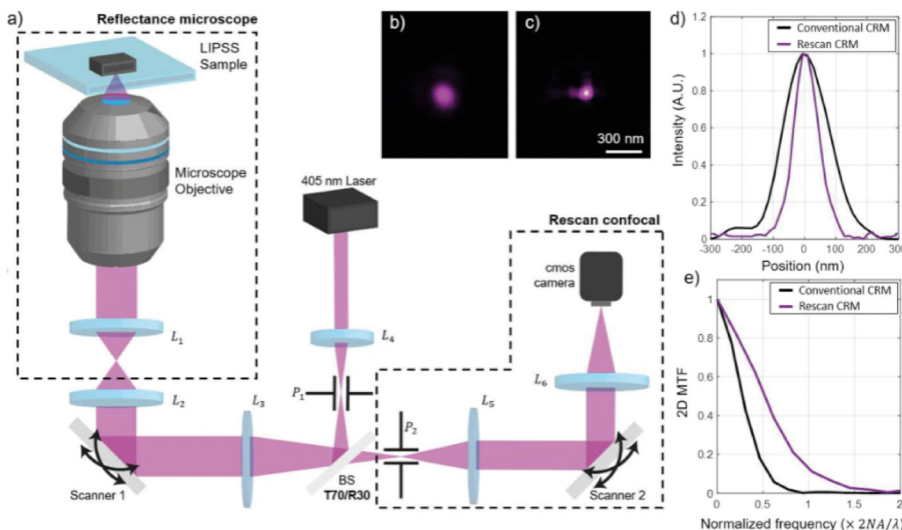
Pour répondre aux défis de la caractérisation des surfaces texturées à grande échelle, différentes techniques de métrologie optique ont été

explorées, chacune présentant des compromis spécifiques en termes de résolution, champ de visualisation, vitesse et intégration dans les lignes de production (Figure 3).

**La Microscopie Électronique à Balayage (MEB)** demeure la référence absolue en termes de résolution latérale, capable d'atteindre l'échelle sub-nanométrique. Toutefois, ses contraintes intrinsèques — nécessité d'un vide poussé, préparation destructive des échantillons non-conducteurs et temps d'acquisition élevés pour de grands champs de vision — limitent son intégration dans les flux de production à haute cadence.

**La Tomographie par Cohérence Optique (OCT) et l'imagerie confocale** offrent des capacités remarquables d'analyse tridimensionnelle. Bien qu'elle soit extrêmement performante pour la métrologie axiale (profondeur), sa résolution latérale reste gouvernée par la limite de diffraction optique  $\sim 400$  nm, ce qui la rend inadaptée à la caractérisation de motifs LIPSS précédemment décrits dont la taille et la périodicité des structures sont de quelques centaines de nm.

Pour aller au-delà de la limite de diffraction optique, la **scatterométrie (ou Optical Critical Dimension - OCD)** [4] s'est imposée comme un standard pour l'industrie de la micro-électronique et des semi-conducteurs. Contrairement à l'imagerie directe, la scatterométrie repose sur l'analyse (intensité et angle) de la lumière diffusée réfléchi par une surface structurée (réseau périodique). Si elle offre une précision sub-nanométrique et une vitesse exceptionnelle, elle reste une méthode indirecte : elle nécessite une modélisation mathématique complexe (bibliothèques de modèles) et est strictement limitée à des structures répétitives connues a priori. Si cette technique d'imagerie est couramment utilisée dans le contrôle qualité des wafers du semi-conducteur, il n'existe que très peu d'équipements facilement intégrable pour les applications de procédés laser. De plus, l'usage de cet équipement ne serait facilement intégrable que pour des surfaces planes et non pour des texturations de surfaces sur des objets 3D.



**Figure 4.** Schéma de principe de la technologie développée par Lotametrix sur microscopie confocale par réflectance (CRM) et à réallocation de photons [6]. (a) Dispositif expérimental et concept pour obtenir une super-résolution confocale sans marquage. (b) PSF (Point Spread Function) du dispositif de métrologie en version microscopie confocal en réflexion. (c) PSF du dispositif de métrologie en version microscopie confocal en réflexion avec réallocation des photons. (d) Distribution normalisée de la PSF dans les configurations b) et c). (e) Fonction de transfert de modulation du dispositif optique.

Pour combler l'écart entre la flexibilité de l'optique et la résolution de l'électronique, les travaux de Pierre Bon (CNRS/XLIM) et José Alberto Aguilar Mora, tous deux fondateurs de la société IOTAMETRIX, ont développé une approche basée sur la réallocation de photons [4]. Cette méthode, dérivée de l'Image Scanning Microscopy (ISM), est optimisée pour fonctionner sans marquage et peut s'intégrer directement dans des lignes de production. Sa rapidité d'acquisition d'images la rend parfaitement adaptée aux procédés d'usinage laser compatible afin de vérifier la qualité des structures mais également comme outil de surveillance des dérives et d'optimisation du procédé pour une industrie 4.0.

**IMAGERIE OPTIQUE NANOMÉTRIQUE À RÉALLOCATION DE PHOTONS.**

L'imagerie optique à haute-résolution (au-delà des limites de diffraction) a connu des avancées majeures ces dernières années, notamment dans le domaine de la biophotonique, où des techniques comme la microscopie STED (Stimulated Emission Depletion), la PALM (Photoactivated Localization Microscopy) ou la STORM (Stochastic Optical Reconstruction Microscopy) ont permis d'atteindre des résolutions nanométriques. Ces méthodes reposent cependant sur l'utilisation de marqueurs fluorescents, nécessitant une modification chimique des échantillons et des étapes de post-traitement complexes. Dans le cadre de la caractérisation de

surfaces texturées par laser, une telle approche est inenvisageable, car elle altérerait les propriétés intrinsèques des matériaux traités. Il est donc impératif de développer des techniques d'imagerie sans marquage, capables de concilier :

- Une résolution spatiale latéral ~100 nm,
- Une vitesse d'acquisition élevée > kHz,
- Et une mise en œuvre simplifiée, compatible avec un environnement industriel.

Historiquement, les compromis technologiques ont segmenté le paysage de la métrologie optique : soit la résolution est sacrifiée au profit de la rapidité et de la flexibilité, soit la complexité opérationnelle limite l'intégrabilité en ligne.

Pour surmonter ces limitations, une approche prometteuse consiste à exploiter la réallocation de photons (Figure 4). Au lieu de simplement enregistrer l'intensité lumineuse détectée comme sur un microscope confocal standard, le système utilise une étape supplémentaire de « re-scan » : la lumière collectée est projetée sur un détecteur 2D (comme une caméra CCD), et chaque photon est réattribué spatialement en fonction de sa position de détection dans le plan du trou de filtrage spatial. Cette réallocation permet d'affiner la localisation des structures et d'améliorer la résolution latérale au-delà de la limite de diffraction. Ainsi dans le cas d'une source laser émettant à 405 nm, le système atteint typiquement une résolution latérale inférieure à 90 nm selon la configuration optique. Le dispositif est compatible avec des cadences de balayage élevées (jusqu'à 24 kHz en ●●●



**Modular wavefront sensing for optics testing**



**Wavefront and MTF for any optical system**

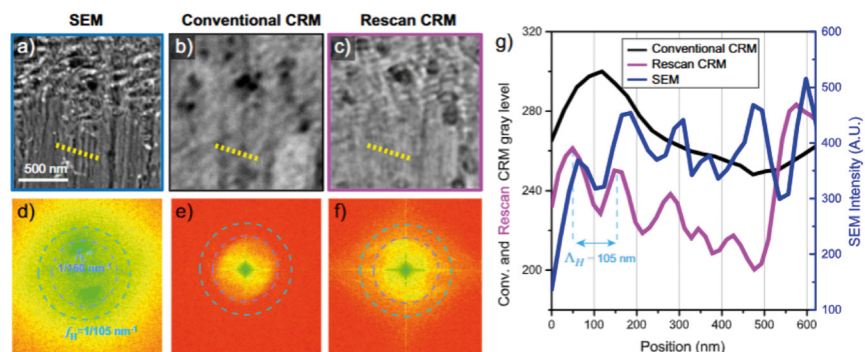


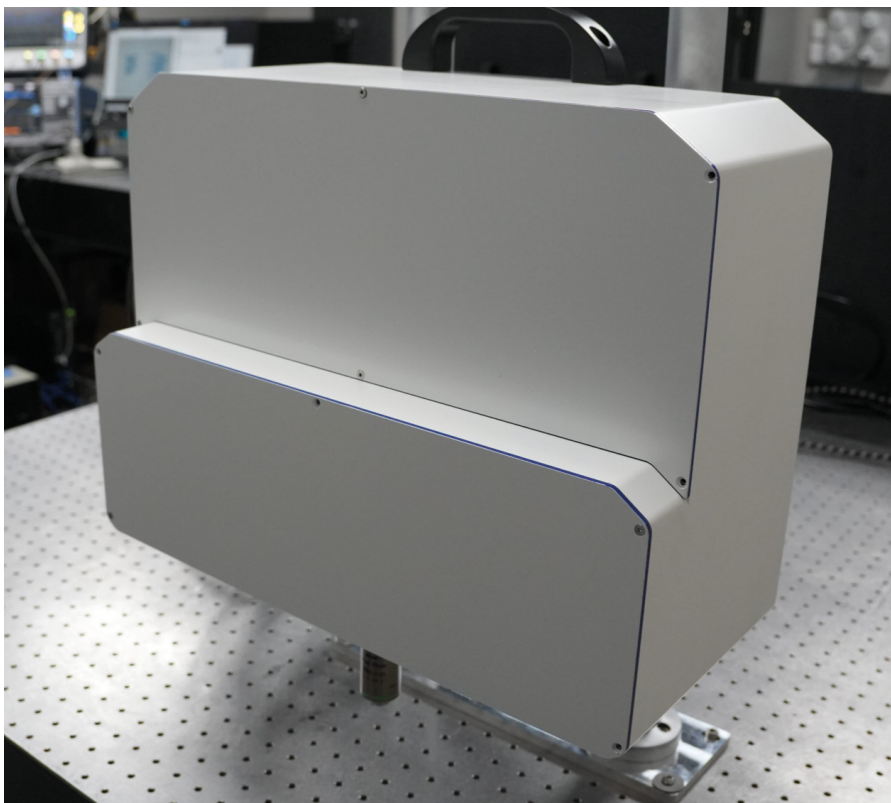
**Plug'n'play modules for every setup**



**Compact solutions from UV to LWIR**

**Figure 5.** Différence entre le standard MEB pour la caractérisation d'une texturation LIPSS, la microscopie confocale en réflectance et la technique avec réallocations des photons [6].





**Figure 6.** Dispositif d'imagerie à réallocation de photons ix01 développé par Iotametrix en collaboration avec ALPhANOV dans le cadre d'un projet de maturation soutenu par XLIM, Université de Limoges, l'incubateur AVRUL.

configuration laboratoire) [5], ce qui le rend utilisable pour un contrôle en temps réel et *in situ*, par exemple lors de la texturation laser de surfaces comparativement aux autres techniques décrites précédemment (Tableau 1).

Après avoir pu valider l'intérêt industriel de la technologie sur différentes texturations de surface de type LIPSS (Figure 5) et avoir comparé les obtenues par rapport à l'imagerie conventionnelle MEB, ALPhANOV et l'ensemble de l'équipe Iotametrix, à travers une phase de co-maturation ont réalisé le premier démonstrateur ix01, totalement intégrable dans un environnement industriel (Figure 6).

### VERS UNE NANOFABRICATION PAR LASER INTELLIGENTE

De nombreux travaux ont émergés ces dernières années sur l'utilisation de l'intelligence artificielle

pour optimiser et prédire les paramètres d'ablation laser, transformant ainsi la texturation de surface en un procédé plus précis et plus agile. Cependant, ces approches nécessitent des bases de données

structurées et riches, idéalement alimentées par des images haute résolution ou des données analytiques issues d'équipements intégrables en ligne, sans perturber les cadences industrielles [7]. Dans ce contexte, les avancées en métrologie optique haute résolution, comme celles développées par IotaMetrix, se révèlent être un levier clé : elles permettent non seulement une caractérisation fine et en temps réel des nanostructures, mais aussi une intégration facilitée dans les lignes de production, répondant ainsi aux exigences de l'industrie 4.0.

Au-delà d'une simple caractérisation intrinsèque, cette synergie entre imagerie optique ultraprécise et l'intelligence artificielle prédictive ouvre la voie à une nanofabrication intelligente. En combinant des données optiques fiables avec des algorithmes d'apprentissage, il devient possible d'envisager une personnalisation massive des surfaces fonctionnelles (hydrophobes, antibactériennes, optiques, etc.), tout en réduisant significativement les rebuts grâce à un contrôle qualité auto-adaptatif.

À terme, cette convergence technologique pourrait démocratiser l'accès à des surfaces sur mesure, tout en renforçant la compétitivité des filières industrielles dans des secteurs stratégiques comme l'aéronautique, le biomédical ou l'énergie. ●

## RÉFÉRENCES

- [1] F. Fraggelakis, G. Mincuzzi, J. Lopez, I. Manek-Hönniger, R. Kling, *Appl. Surf. Sci.* **470** (2018)
- [2] A. Sikora, M. Faucon, L. Gemini, R. Kling, G. Mincuzzi, *Appl. Surf. Sci.* **591**, 153230 (2022)
- [3] Nikon Global Product Database, Riblet surface technology overview, available at <https://ngpd.nikon.com/en/riblet/overview/>
- [4] M. Madsen, P.-E. Hansen, *Surf. Topogr.: Metrol. Prop.* **4**, 023003 (2016)
- [5] D. Ta, A. Aguilar, P. Bon, *Opt. Express* **31**, 36420 (2023)
- [6] J. Aguilar Mora, A. Abou Khalil, D. Pallarés Aldeiturriaga, X. Sedao, C. Mauclair, P. Bon, *Sci. Rep.* **13** (2023)
- [7] E. Mottay, W. M. Barkat, E. Barjou, A. Bertrand, G. Mincuzzi, "Machine learning assisted optimization of surface roughness on silicon," *Proc. SPIE PC13351, Laser-based Micro- and Nanoprocessing XIX*, PC1335111 (2025).