

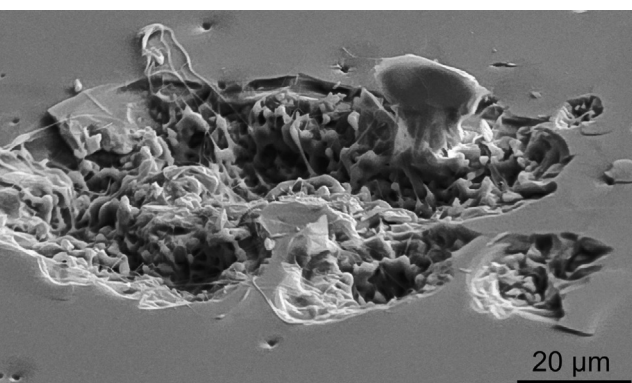
L'ENDOMMAGEMENT LASER SUR LES LASERS DE PUISSANCE

Laurent GALLAIS^{1,*}, Laurent LAMAIGNÈRE^{2,+}

¹ Aix Marseille Univ, CNRS, Centrale Marseille, Institut Fresnel, 13013 Marseille, France

² CEA CESTA, F-33116 Le Barp, France

*laurent.gallais@fresnel.fr - *laurent.lamaignere@cea.fr



<https://doi.org/10.1051/photon/202311846>

Article publié en accès libre sous les conditions définies par la licence Creative Commons Attribution License CC-BY (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0>), qui autorise sans restrictions l'utilisation, la diffusion, et la reproduction sur quelque support que ce soit, sous réserve de citation correcte de la publication originale.

Lorsqu'un fort flux laser traverse ou est réfléchi sur un composant optique, le couplage du rayonnement laser dans la matière (par absorption intrinsèque, par absorption sur des défauts locaux, ou par absorption non-linéaire) peut conduire à des effets irréversibles altérant la fonction optique du composant et pouvant même le rendre inutilisable. Ces modifications permanentes du matériau sont définies comme des « endommagements laser ». C'est un verrou technologique majeur à l'essor des sources lasers à haute puissance ou haute énergie, puisque qu'il limite la densité de puissance ou d'énergie accessible, affecte la durée de vie des composants optiques, ainsi que le coût de maintenance des chaînes laser.

Le développement de lasers énergétiques et puissants s'appuie sur de nombreuses innovations technologiques depuis les travaux initiaux de Maiman. L'évolution des procédés de fabrication des optiques a permis de grandement réduire le risque d'endommagement laser sur les installations laser de puissance comme le

LMJ, APOLLON, PETAL.... En particulier, c'est l'amélioration des procédés de polissage, de traitement chimique et de dépôt de couches minces des composants optiques qui a permis de fortement réduire la présence de défauts pouvant mener à leur endommagement par laser. Toutefois, la puissance peut être limitée sur ces installations à cause de la problématique d'endommagement préférentiellement sur les composants de fin

de chaîne pour lesquels les densités de puissance sont les plus importantes. Ces dommages lasers ont notamment un impact sur les caractéristiques optiques du composant et peuvent dégrader ses performances, le rendre inutilisable et au final affecter les performances globales de l'installation (en termes de puissance et de qualité du faisceau). Outre les optiques, la qualité des faisceaux est tout aussi fondamentale car les

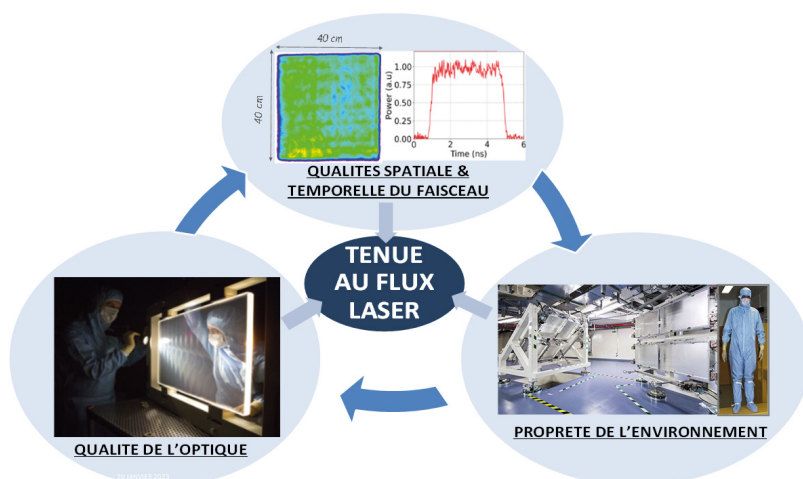
modulations spatiales et temporelles vont conduire à des surintensités dans les faisceaux, néfastes pour l'endommagement des optiques en aval. Enfin la propreté de l'optique et de l'environnement est un aspect essentiel car les poussières, les contaminations moléculaires et particulaires sont des sources d'endommagement. In fine, la problématique de l'endommagement peut être vue comme un triptyque, illustré en Fig.1, impliquant la qualité des optiques, des faisceaux et de l'environnement. Ces facteurs d'endommagement peuvent ainsi conduire à l'amorçage de dommages de taille micrométrique, finalement petite devant la dimension centimétrique des optiques. Mais ces dommages peuvent ensuite croître lors des illuminations successives correspondant à la phase de croissance, ce phénomène est illustré dans l'encart 1. Enfin, la propagation du faisceau est modulée par le dommage, conduisant à des surintensifications locales du faisceau dépendant des dimensions et de la forme du dommage, qui reportées sur les optiques en aval peuvent créer à leur tour un endommagement par effet fratricide. La phénoménologie de l'endommagement laser peut ainsi se synthétiser en une phase d'amorçage du dommage, suivie d'une phase de

croissance couplée à un endommagement potentiel sur des composants en aval par propagation.

LES MÉCANISMES PHYSIQUES DU COUPLAGE LASER/MATIÈRE

L'endommagement laser résulte du couplage et du transfert de l'énergie laser dans le matériau qui peut avoir pour conséquences différentes dégradations physiques du matériau : fusion, vaporisation, fracturation, éjection de matière... Ces mécanismes sont complexes et pour les décrire de façon détaillée, il est nécessaire de faire appel à des codes de calcul qui peuvent être très complexes. Par exemple l'amorçage d'un dommage par un défaut sur une optique (une particule de contaminant, une rayure) nécessite de traiter le dépôt d'énergie dans le défaut, les transferts de chaleur par conduction et rayonnement, l'augmentation de température, l'ionisation dans la matrice environnante et ses possibles conséquences en termes d'augmentation de l'absorption, la formation d'un plasma, la propagation d'ondes de chocs, les changements de phases... Néanmoins si l'on se concentre sur le mécanisme d'amorçage du dommage (absorption/transferts d'énergie) sans décrire de façon détaillée le processus de dégradation, il est possible de dégager 2 ●●●

Figure 1. Le triptyque de l'endommagement laser sur une chaîne laser de puissance



TRIOPTICS
FRANCE

UN UNIVERS DE PRÉCISION

- Composants et systèmes optiques de précision,
- Spécialiste des surfaces asphériques, jusqu'à diam. 600 mm
- Matériaux usinés : verres, céramiques, métaux,
- Applications : bancs de test, lasers hautes énergie, métrologie optique...



Expandeur de faisceau à miroirs



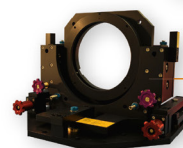
Monture orientable motorisée



Conception optique



Optiques Laser haute énergie



Lentille diam. 300 mm en monture 5 axes



Prisme de précision

Optical Surfaces

Trioptics France

76 rue d'Alsace
69100 Villeurbanne
Téll. 07 72 44 02 03
Fax : 04 72 44 05 06
www.trioptics.fr

types de mécanismes qui gouvernent l'amorçage, que l'on peut qualifier de "photo-électroniques" et "photo-thermiques". Ces 2 mécanismes peuvent être différenciés suivant les caractéristiques temporelles de l'impulsion. Les effets thermiques interviennent pour de longues durées d'interaction alors que les effets photo-électroniques correspondent aux courtes durées

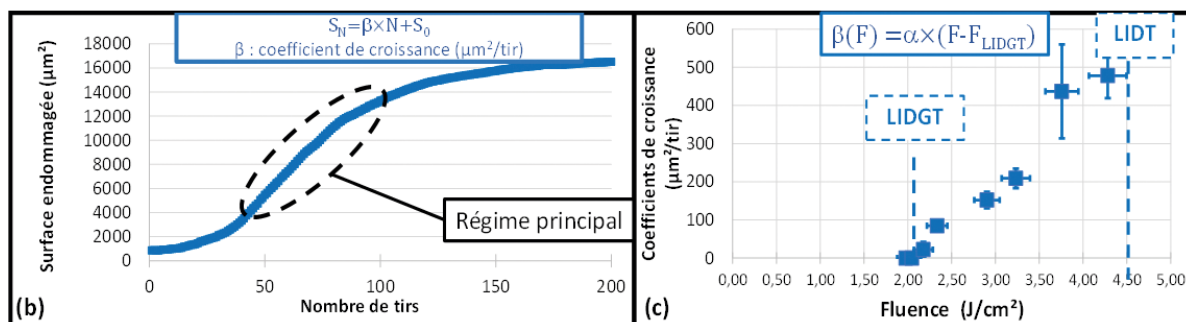
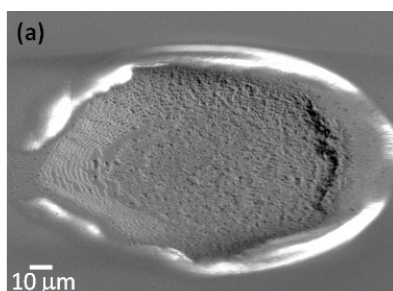
d'interaction. Dans le cas de matériaux diélectriques, la limite entre ces 2 domaines se situe entre la ps et la centaine de ps, ce qui correspond aux temps caractéristiques des échanges entre les électrons photo-excités et les atomes constitutifs du matériau.

Lors de l'illumination par un rayonnement laser de forte densité de puissance, une partie de la

puissance incidente est absorbée par le matériau et restituée sous forme de chaleur. Cette interaction dépend à la fois des paramètres du faisceau laser (durée d'impulsion, taux de répétition, taille du faisceau...) et du matériau. L'absorption de la puissance du rayonnement laser va provoquer une augmentation de la température dans le milieu absorbant et par

LA CROISSANCE DES DOMMAGES

Lors de la phase d'amorçage, le dommage est de taille micrométrique. Lors des illuminations successives, il peut croître et atteindre des tailles millimétriques. L'évolution du dommage peut être mesurée en laboratoire avec des faisceaux suffisamment grands et avec un suivi de l'évolution du dommage au moyen d'un microscope permettant de mesurer ses dimensions au cours de la phase de croissance. La photographie (a), obtenue au moyen d'un microscope électronique à balayage, montre les délaminations des couches d'un miroir diélectrique lors de la croissance. La courbe d'évolution des dimensions du dommage en fonction des illuminations successives permet de connaître la dynamique de croissance qui dépend des matériaux et des paramètres laser. Elle peut être linéaire dans le cas de miroirs diélectriques comme reporté dans le graphe (b) pour le régime principal, voire exponentielle pour des verres. La croissance est un phénomène à seuil, c'est-à-dire que le dépôt d'énergie doit être suffisant pour conduire à une évolution du dommage : en-dessous du seuil, le dommage n'évolue pas et reste stable. Au-dessus du seuil, la dynamique est d'autant plus forte que le dépôt d'énergie est important, le coefficient de croissance (β) dans les relations reportées dans les graphes (b) et (c) augmente avec l'éclairement comme illustré sur le graphe (c). Ainsi un seuil de croissance est estimé (LIDGT pour Laser-Induced Damage Growth Threshold) en-dessous duquel le laser peut continuer à fonctionner sans évolution du dommage et au-dessus duquel le coefficient de croissance, qui rend compte de l'évolution du dommage, permet d'estimer ce qui est communément appelé la durée de vie de l'optique, cela permet également d'ajuster le profil d'emploi du laser.



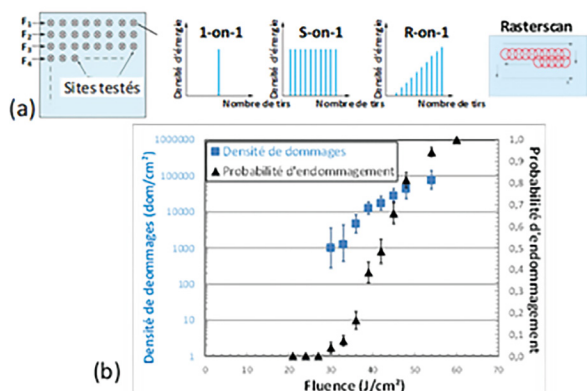


Figure 2. (a) Description des procédures de tests permettant d'estimer (b) des probabilités et des densités de dommages. Celles-ci sont liées par une relation simple [3,4], ainsi les résultats de la figure (b) sont issus d'un même jeu de données.

transfert de chaleur, dans les autres milieux (empilement de couches minces par exemple). Cette augmentation de la température s'arrête lorsque les pertes (conduction, rayonnement) compensent l'apport induit par le rayonnement laser. L'augmentation de la température va donner lieu à de nombreux effets : expansion thermique, contraintes, biréfringence, effets non-linéaires, emballement thermique (augmentation de l'absorption avec la température), fissuration, fusion, vaporisation... L'endommagement du matériau intervient alors du fait d'un ou plusieurs de ces effets.

Lors de l'interaction d'une impulsion intense (forte puissance crête) dans un matériau diélectrique transparent à la longueur d'onde d'irradiation, des mécanismes d'absorption de nature non-linéaire et intrinsèques au matériau peuvent intervenir (photo-ionisation). Ces processus vont entraîner la génération d'électrons libres dans le matériau dont la densité va croître durant l'impulsion. Le matériau initialement transparent peut alors devenir fortement absorbant et acquérir progressivement les caractéristiques optiques d'un métal. Localement, la matière se trouve ainsi sous la forme d'un plasma qui va interagir avec l'impulsion laser. L'énergie déposée dans ce plasma va être transférée au matériau, pendant et après l'impulsion laser par relaxation, ce qui peut conduire à un endommagement si cette énergie dépasse un certain seuil.

LA MÉTROLOGIE DE L'ENDOMMAGEMENT LASER

Le principe général des mesures de la tenue au flux laser des composants optiques consiste à illuminer le matériau à différents niveaux d'énergie ou de puissance et à détecter à chaque tir la présence ou non d'un dommage. On peut ensuite tracer la probabilité d'endommagement, ou la densité de dommages sur l'optique en fonction de la densité d'énergie ou de puissance. Pour effectuer ces tests, différentes procédures existent, dont les principes sont définis par ●●●



Helios Plus



BeamWatch Integrated



Mesure de faisceau laser pour la production automatisée

Les systèmes de mesure Ophir pour les applications industrielles offrent des boîtiers robustes et des interfaces de communication ProfiNET, Ethernet-IP et RS-232.

Helios Plus – Puissance-mètre laser compact

- Mesure jusqu'à 12 kW en quelques secondes
- Simple à intégrer
- Fonctionne sans refroidissement
- Pour les longueurs d'onde NIR, vert et bleu

BeamWatch Integrated – Diagnostic complet de faisceau laser

- Mesure sans contact de la position et du diamètre du foyer
- Image en temps réel de la caustique du laser
- Mesure complète en moins d'une seconde

Appelez-nous +33 6 01 01 27 32

www.ophiropt.com

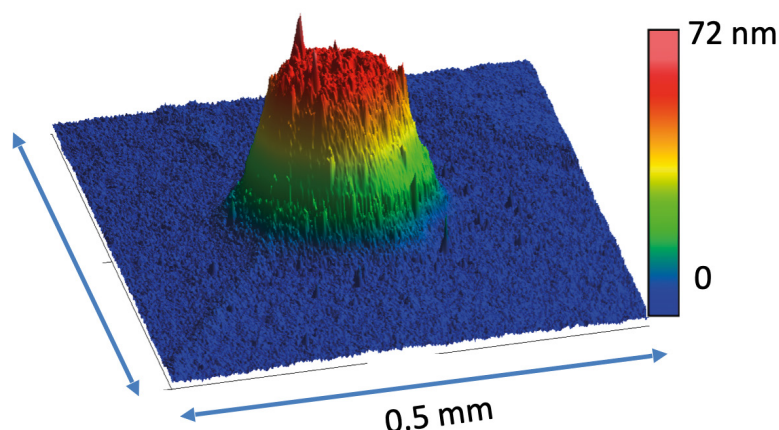
les normes internationales [1]. Deux types principaux de tests de tenue au flux peuvent être distingués : la tenue à un tir laser et la tenue à une série de tirs laser pour tenir compte d'éventuels effets de fatigue, et également lors d'illuminations à bas flux pour prendre en compte des effets de contamination induite par laser (LIC en anglais) expliqués dans l'encart 2. Les mesures sont généralement réalisées en laboratoires dans lesquels des dispositifs de mesure dédiés sont mis en œuvre. En effet, il est nécessaire

de connaître précisément les principaux paramètres de l'impulsion laser tels que la surface du faisceau, son énergie et la durée de l'impulsion pour déterminer les densités d'énergie ou de puissance correspondant à l'illumination laser car l'endommagement dépend fortement de ces paramètres. Il est donc important de bien les mesurer et d'utiliser des valeurs normalisées pour effectuer des comparaisons ou des mises à l'échelle. C'est ainsi qu'un faisceau est décrit par sa surface effective,

sa durée effective et son énergie [2]. Pour la détection des dommages, les techniques les plus couramment utilisées *in-situ* sont la microscopie et la diffusion qui sont complétées par des observations fines réalisées port-mortem en microscopie électronique à balayage. La caractérisation d'un composant à partir d'une mesure statistique est généralement nécessaire du fait de son inhomogénéité et de la répartition aléatoire des précurseurs à l'endommagement, qu'elle soit locale ou parce qu'une distribution de défauts caractérise le composant. Ainsi des densités de dommages sont estimées à partir du balayage d'une surface donnée d'un composant, procédure communément appelée rasterscan, décrite dans la Fig. 2, qui est pertinente pour la mesure d'optiques de bonne qualité avec de très rares défauts, balayage réalisé à la valeur d'éclairement à laquelle le composant optique est utilisé. Une estimation de la tenue au flux laser (TFL) du composant est aussi possible avec des procédures de type 1on1, Son1 et Ron1 (voir Fig. 2) qui donnent une information sur la probabilité d'endommagement du composant. Des traitements mathématiques tenant compte de la distribution de la population de défauts permettent de faire la correspondance entre les densités de dommages et les probabilités d'endommagement estimées par les différentes procédures. Plus de précisions sont données dans les références [3] et [4].

LA CONTAMINATION INDUITE PAR LASER OU LIC

Généralement les systèmes laser doivent opérer à un point de fonctionnement permettant une large marge de sécurité pour éviter d'endommager les optiques. Cependant, si des composants peuvent démontrer une tenue au flux laser élevée, leur fiabilité à long terme peut être insatisfaisante même



s'ils sont exploités sous cette limite. Un effet particulièrement néfaste est l'interaction entre le faisceau laser, les composés volatils de l'atmosphère ambiante et la surface optique qui peuvent déclencher la formation, sur la surface exposée au flux, de couches nanométriques hautement absorbantes ou diffusantes. Ce processus de dépôt indésirable, appelé contamination induite par laser (Laser-Induced Contamination, LIC), peut être responsable d'une perte des performances optiques accélérée (dégradation de la réflexion / transmission, de la qualité du front d'onde) et peut finalement aboutir à un dommage laser des composants optiques. Cet effet s'avère extrêmement critique pour des lasers UV caractérisés par le rayonnement de photons très énergétiques. Les effets LIC sont aussi particulièrement préjudiciables dans le régime d'impulsions courtes pour lesquels des processus d'absorption multi-photonique peuvent être activés.

DES COMPOSANTS OPTIQUES RÉSISTANT À DE FORTS FLUX LASER

La production de composants optiques résistant aux forts flux laser est bien entendu un enjeu majeur. Compte tenu des éléments discutés, il existe cependant des limites intrinsèques aux matériaux. Les matériaux utilisés pour les applications de haute puissance doivent présenter une absorption la plus faible possible à la longueur d'onde d'intérêt, typiquement sous la ppm

(partie par million), une largeur de bande interdite élevée (autour de 9eV pour la silice UV par exemple) et très peu d'impuretés. La préparation des surfaces de ces matériaux, notamment l'étape de polissage, est particulièrement critique puisque du fait des processus abrasifs et des éléments utilisés (micro/nanoparticules d'abrasion) la surface est caractérisée par la présence de fractures et résidus de polissage particulièrement délétères pour la tenue au flux laser. Les procédés adaptés doivent donc réduire autant que possible l'épaisseur de la couche superficielle affectée par le polissage. Le nettoyage, le stockage des composants et de manière générale tout ce qui peut amener à la présence de contaminants sur la surface (environnement des optiques) sont également des points critiques à maîtriser. Les couches minces optiques sont présentes sur la majorité des composants optiques

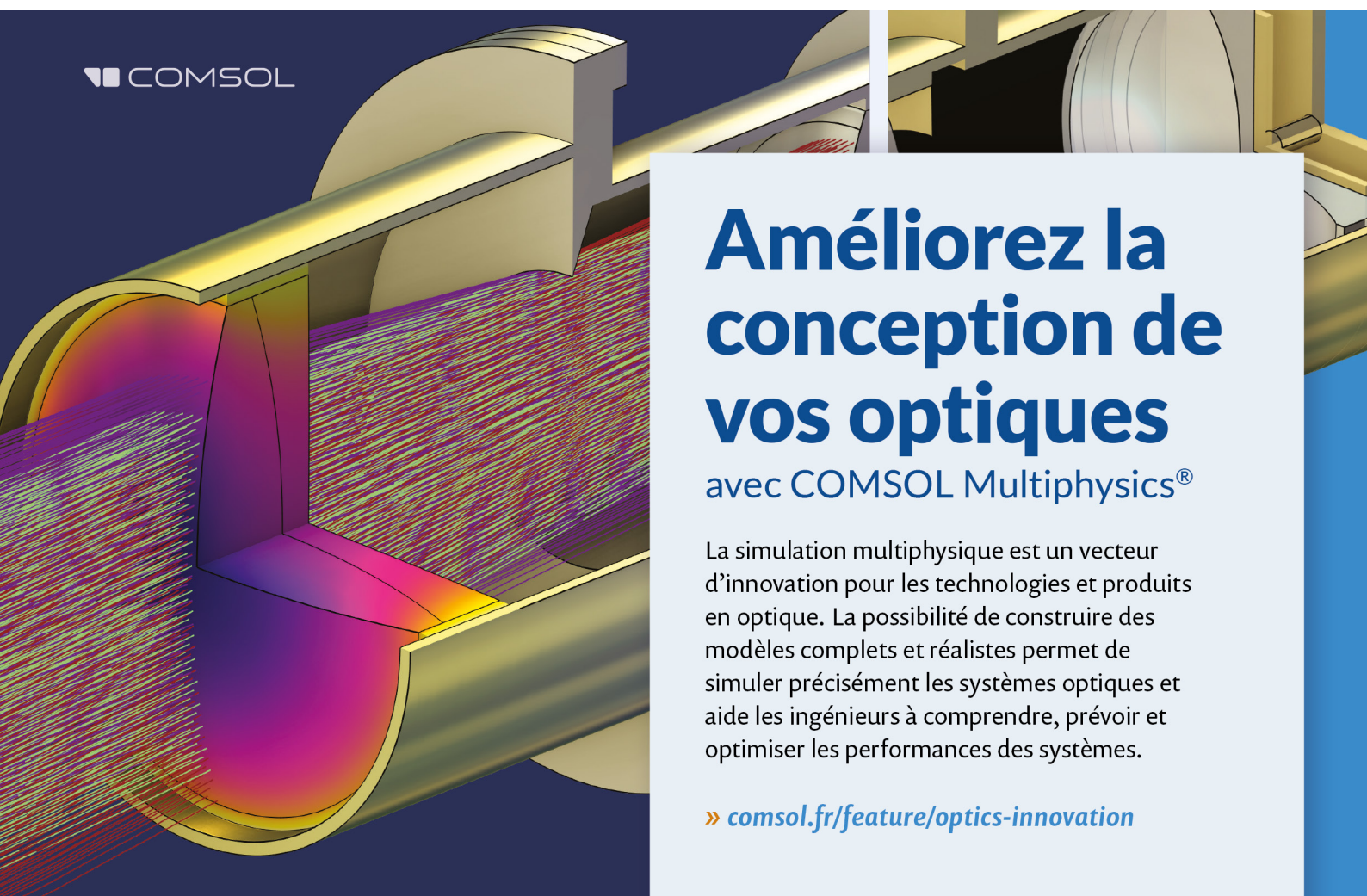
utilisés dans les systèmes lasers pour contrôler spectralement la réflexion et la transmission. Ces traitements multicouches sont souvent un point faible en ce qui concerne la tenue au flux laser car les matériaux déposés n'ont pas la qualité des matériaux massifs et présentent des défauts structuraux et macroscopiques. Le choix des matériaux, les conditions de fabrication et la conception de

l'empilement ont une influence majeure sur la tenue au flux laser.

Enfin la seule possibilité restante pour augmenter la puissance laser reste de diminuer la densité de puissance en augmentant la surface du faisceau, d'où le gigantisme de certaines installations lasers (Laser Mégajoule par exemple). Une alternative consiste également à « réparer » les dommages laser [5]. ●

RÉFÉRENCES

- [1] ISO Standard Nos. 21254-1-212541-4, 2011.
- [2] L. Gallais, 'Métrologie de l'endommagement laser', Techniques de l'ingénieur R 6 738 (2010)
- [3] L. Lemaître *et al.*, Rev. Sci. Instrum. **90**, 125102 (2019).
- [4] H. Krol *et al.*, Opt. Commun. **256**, 184 (2005).
- [5] L. Gallais et P. Cormont, 'Procédés d'usinage laser CO2 de composants optiques en silice', Photoniques **112**, 36 (2022).



Améliorez la conception de vos optiques

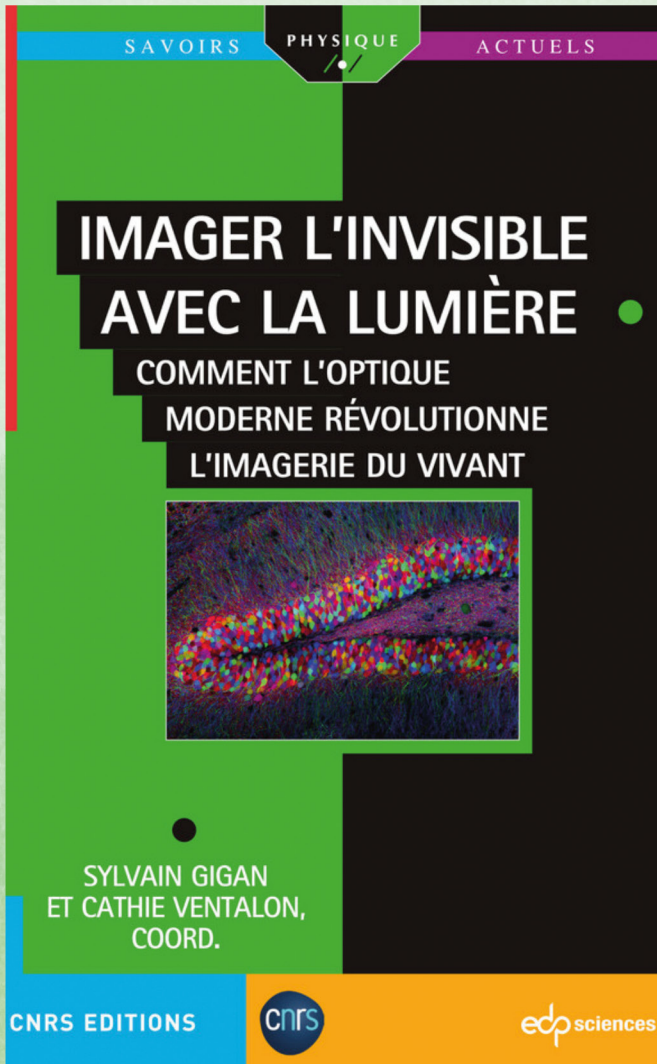
avec COMSOL Multiphysics®

La simulation multiphysique est un vecteur d'innovation pour les technologies et produits en optique. La possibilité de construire des modèles complets et réalistes permet de simuler précisément les systèmes optiques et aide les ingénieurs à comprendre, prévoir et optimiser les performances des systèmes.

» comsol.fr/feature/optics-innovation

Comment l'optique moderne révolutionne l'imagerie du vivant

VIENT DE
paraître



COORDONNÉ ET ÉCRIT PAR
**CATHIE VENTALON ET
SYLVAIN GIGAN**



Disponible aussi en format e-book
En vente sur laboutique.edpsciences.fr

ISBN : 978-2-7598-2654-4
140 pages illustrées
Prix : 22 €

Notre œil est un outil exceptionnel qui reste néanmoins limité en résolution et en sensibilité. Même avec les appareils traditionnels de l'optique, comme les microscopes, il n'est pas possible de pénétrer les environnements complexes. Les nouveaux instruments, en particulier les lasers, ont permis des avancées considérables, notamment dans le domaine de la médecine.

Le livre présente de manière accessible les concepts physiques en jeu et montre que nous avons aujourd'hui des outils permettant de répondre à des questions fascinantes : comment fonctionne notre cerveau, neurone par neurone ? Peut-on détecter précocement un cancer ou des maladies de la rétine ?

Cathie Ventalon est chercheuse CNRS à l'institut de biologie de l'École normale supérieure. Elle développe de nouvelles méthodes optiques pour les neurosciences, dans le but d'étudier le lien entre l'activité neuronale et les comportements, la mémoire ou la perception sensorielle.

Sylvain Gigan est professeur à Sorbonne Université et chercheur au Département de Physique de l'École normale supérieure. Il travaille sur la propagation de la lumière, en particulier pour l'imagerie, dans les milieux complexes et biologiques.

