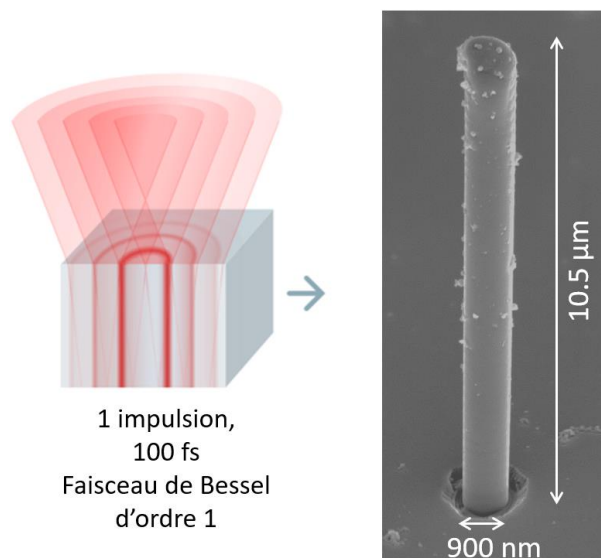


Lumière femtoseconde structurée pour structurer la matière

François COURVOISIER

¹Université Marie et Louis Pasteur, CNRS, institut FEMTO-ST, F-25000 Besançon, France

[*francois.courvoisier@femto-st.fr](mailto:francois.courvoisier@femto-st.fr)



Cet article a été publié dans la revue *Photoniques* sous la référence :

Lumière femtoseconde structurée pour structurer la matière,
François Courvoisier, *Photoniques*, 132, 38-41 (2025) <https://doi.org/10.1051/photon/202413238>

Les lasers ultrabrefs, dans le régime femtoseconde, ont révolutionné l'interaction laser-matière car ces impulsions peuvent déposer une grande densité d'énergie pour modifier les matériaux, en particulier les matériaux transparents. Une seconde révolution est à l'œuvre, basée sur la structuration spatiale de ces impulsions pour développer de nouveaux procédés de modification des matériaux, inaccessibles par d'autres moyens technologiques.

Les lasers femtoseconde ont été une révolution dans le monde de la structuration des matériaux, avec des applications au micro-usinage d'une précision inégalée ou à la chirurgie de l'œil. Cette précision accrue a une origine : le dépôt d'énergie par l'impulsion laser est réalisé de façon extrêmement localisée dans l'espace, au sein du gaz électronique du solide, avant les couplages vers le réseau et la diffusion thermique. Ceci permet d'atteindre localement des températures très élevées, bien au-dessus du seuil de sublimation, avec un minimum d'énergie. Dans le cas de l'ablation laser, très peu d'énergie reste au sein de la matière après interaction, ce qui minimise les dommages collatéraux et permet une précision inférieure au micron. Dans le domaine de l'optique, la capacité la plus spectaculaire des lasers femtosecondes est de permettre la structuration des matériaux transparents, comme la cornée ou la silice fondue, grâce à l'ionisation non-linéaire. Modifications d'indice, inscription de nano-réseaux périodiques, ou ouverture de nano-vides au sein de la matière sont rendues possibles par la génération d'un plasma, c'est-à-dire une assemblée d'électrons-libres dans le diélectrique par transition non-linéaire effectuée sous champ

laser intense, entre la bande de valence et la bande de conduction. La densité d'énergie déposée dans le plasma détermine le type de modification physique.

Jusque dans les années 2010, d'importants efforts de recherche en structuration de la lumière par holographie et le développement de valves optiques ont permis l'ablation femtoseconde en surface avec tout type de formes. Cependant, la structuration tri-dimensionnelle au sein même des diélectriques transparents était une gageure. En effet, lors de la propagation d'une impulsion laser femtoseconde intense au sein d'un diélectrique, plusieurs effets non-linéaires se combinent et déstabilisent fortement l'impulsion : l'effet Kerr d'autofocalisation et la génération de plasma qui, bien que nécessaire pour effectuer le dépôt d'énergie dans la matière, abaisse l'indice de réfraction et défocalise l'impulsion. Ces deux effets génèrent des régimes de propagation extrêmement non-linéaires, difficilement prédictibles.

Ces effets non-linéaires limitent fortement le développement d'applications où il s'agit d'obtenir des structures très allongées et uniformes, comme des guides d'onde, des piliers pour les réseaux de Bragg ou encore de longs nano-vides pour réaliser des cristaux photoniques ou des méta-surfaces. La solution est de supprimer l'effet Kerr en utilisant de fortes focalisations, avec des ouvertures numériques typiquement au-dessus de 0.8. Mais, avec des faisceaux Gaussiens, la longueur de Rayleigh est très limitée, rendant impossible la structuration sur de longues distances de plusieurs dizaines de microns. D'autres solutions sont nécessaires.

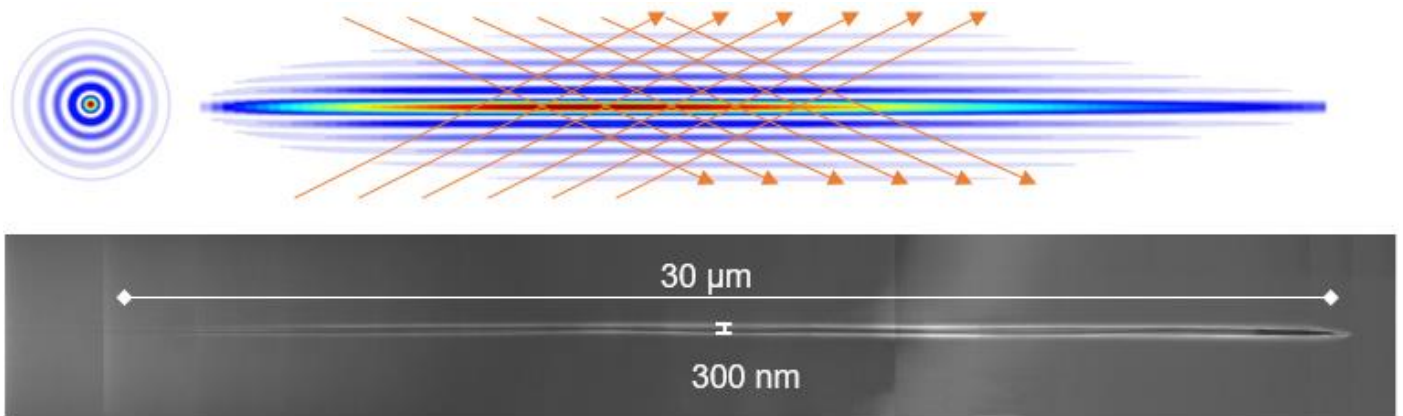


Figure 1 (haut) Coupes transverses et longitudinales d'un faisceau de Bessel d'ordre zéro. Les rayons optiques tracés en orange soulignent le phénomène d'interférence menant à la génération d'un lobe central intense. (bas) Nano-vide induit dans du saphir par une unique impulsion laser femtoseconde. Ce nano-vide de 300 nm de diamètre n'est pas débouchant, la matière a été compressée sur les bords.

C'est dans ce cadre qu'intervient la lumière structurée, et en particulier les faisceaux non-diffractants. Nous pouvons remarquer que la forte non-linéarité de l'ionisation non-linéaire de la silice fondue joue le rôle d'un effet de seuil : au-dessous d'une certaine intensité lumineuse, l'ionisation a une probabilité quasi-nulle. Ainsi, même si le faisceau est spatialement complexe, par exemple avec des franges d'interférences, seules les zones d'intensité au-dessus du seuil seront sujettes à création de plasma. Dans ce contexte, les faisceaux de Bessel sont d'excellents candidats puisqu'ils peuvent être générés à haute ouverture numérique, créer un spot central dépassant l'intensité seuil sur une distance arbitraire, uniquement limitée par l'énergie totale de l'impulsion lumineuse. Un exemple est en figure 1. Ce type de faisceau est dû à une interférence, comme l'indiquent les rayons optiques, à symétrie cylindrique, générée grâce à un axicon ou un modulateur de phase spatiale. Pour des applications à la structuration laser décrites ci-dessous, l'interférence constructive centrale a un diamètre de typiquement de 1 μm, mais peut s'étendre sur des distances de propagation de plusieurs dizaines de micromètres, voire 1 cm, sans subir de modification de diamètre [1].

Un effet spectaculaire : une ouverture de vide à très haut rapport de forme

Dans le cas d'un faisceau de Bessel très focalisé, un nano plasma est généré, et sa forte densité mène à l'ouverture d'un nano vide à très haut rapport de forme à l'intérieur même des diélectriques. La figure 1(bas) présente un exemple de nano vide ouvert à l'intérieur du saphir, sans que ce nano canal ne soit débouchant ni d'un côté ni de l'autre. La pression a été suffisante pour comprimer la matière sur les côtés [2].

L'ouverture d'un canal à l'intérieur des solides tend à générer des micro-fractures à une distance d'environ 1 μm du centre du canal, après une zone de matériau comprimé. Celles-ci peuvent initier des fractures du matériau dans son ensemble. Cette approche est mise à profit pour cliver le verre par exemple après inscription laser d'une série de nano vides séparés entre eux par une distance typique de 5 μm . Cette technique est appelée le « stealth dicing » (ou « découpe furtive »), et a été fortement développée pour la découpe des écrans, comme ceux des smartphones. A présent, grâce à la montée en puissance des lasers ultrabrefs, des verres plus épais peuvent être coupés, avec de nombreuses applications dans tous les domaines technologiques et de la vie courante.

Et la physique sous-jacente ?

En réalité, le succès des faisceaux non-diffractants n'est pas qu'une histoire de géométrie. En effet, l'abaissement de l'indice de réfraction par la création de plasma affecte très fortement l'impulsion laser, même lorsque celle-ci est focalisée. Le mécanisme exact permettant la création d'un plasma très dense et très localisé est resté longtemps énigmatique. Les modèles numériques ne permettaient pas de reproduire nos observations expérimentales. Le projet ERC PULSAR nous a permis d'identifier la physique sous-jacente, et de comprendre les mécanismes-clés à l'œuvre. L'effet le plus important est le mécanisme d'absorption résonnante. Lorsqu'une onde électromagnétique est en incidence oblique sur un gradient de plasma, elle peut être convertie en onde longitudinale (une oscillation électrostatique), au niveau de la zone de densité de critique, où la permittivité s'annule. Cette conversion, associée à l'amortissement Landau, permet de « stocker » de façon extrêmement efficace l'énergie de l'onde incidente au niveau de la zone de densité critique. Il se trouve que les faisceaux non-diffractants à fort angle de focalisation sont justement en incidence oblique sur les plasmas, proche de l'optimum d'efficacité de conversion, c'est-à-dire dans des conditions idéales pour exciter ce mécanisme d'absorption résonnante et de localisation extrême du dépôt d'énergie.

Une physique très riche existe à l'intérieur de ces nano – plasmas, qui peut être étudiée grâce à des simulations de type « Particle-in-Cell », qui résolvent simultanément les équations de Maxwell et les équations des trajectoires de groupes d'électrons. Ce type de simulation permet de capturer les effets physiques liés à des distributions électroniques comportant un nombre significatif d'électrons chauds. La densité d'énergie déposée par l'impulsion laser et de l'ordre de 10 MJ/kg, sur un cylindre d'environ 400 nm de diamètre, et sur une longueur arbitraire. En quelques dizaines de picosecondes, ce nano cylindre à très haut rapport de forme voit sa température augmenter fortement jusqu'à plusieurs électronvolts. Cette gamme de température, à une densité solide, correspond aux conditions de la matière dense et chaude, qui est l'état de la matière au cœur d'un grand nombre d'objets astrophysiques, comme les planètes ou les naines brunes, état de la matière qui reste encore très difficile à modéliser et analyser. Ainsi, les diélectriques excités par des faisceaux non-diffractants femtosecondes pourraient se révéler être également des plateformes intéressantes pour l'étude de la physique à haute densité d'énergie, en particulier pour l'explorer avec des rayonnements synchrotron qui nécessitent de grandes distances d'interaction.

Du côté de l'optique, ces nano-plasmas à haut rapport de forme peuvent également trouver des applications en optique non linéaire. Nous avons par exemple observé expérimentalement de la génération de seconde harmonique et prédit numériquement la génération d'ondes dans la gamme THz [3]. La surface à permittivité nulle générée par la présence d'une forte densité de plasma est le lieu de multiples effets non-linéaires.

Un grand nombre d'applications en photonique

Dans la dernière décennie, d'autres formes de faisceaux non-diffractants ont été développées pour structurer les matériaux. L'amélioration de la fiabilité de la technique de découpe à haute vitesse des verres a été améliorée grâce à des faisceaux de Bessel de type « elliptique », générant des nano vides non circulaires, qui permettent d'améliorer la fiabilité de la fracture par augmentation du stress local.

Une autre classe de faisceaux non-diffractants a été utilisée pour la découpe en courbe : il s'agit des faisceaux « accélérants ». Cette classe de faisceaux génère un lobe d'intensité de forme courbée lors de la propagation, comme si la lumière décrivait une parabole. En réalité, la structure de ces faisceaux correspond à une caustique, dont il est possible de prédire le masque de phase grâce à la théorie des catastrophes. Ces faisceaux accélérants ont permis de

réaliser des découpes avec un chanfrein comme présenté sur la figure 2, alors même que la pièce à découper est placée perpendiculairement à l'axe du faisceau [4]. Ceci est particulièrement utile pour la découpe des verres, pour lesquels il convient d'éviter que des arêtes carrées localisent le stress et tendent à s'écailler. Réaliser cette étape en une seule passe grâce au laser serait particulièrement intéressant afin d'éviter les procédés de polissage particulièrement coûteux en énergie.

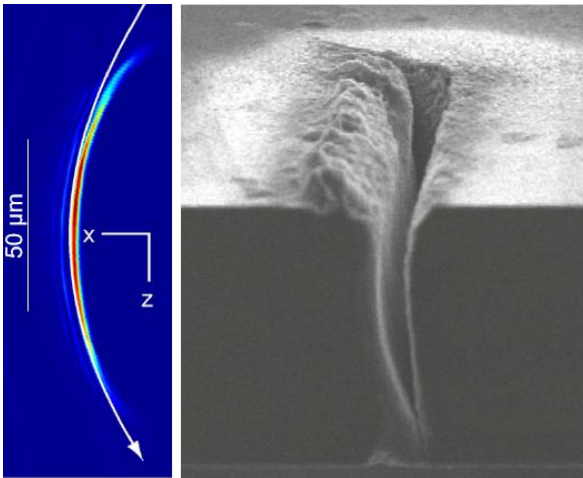


Figure 2 (gauche) Distribution d'intensité expérimentale d'un faisceau accélérant se propageant du haut vers le bas. La flèche indique la position attendue de la caustique. (droite) Découpe de silicium à l'aide du faisceau accélérant, présentant un profil courbe [4].

Un nouveau procédé d'extrusion par laser femtoseconde

Avec une autre structuration d'impulsion femtoseconde, notre équipe a tout récemment découvert un nouveau phénomène qui ne s'apparente à de la fabrication ni soustractive ni additive. Nous avons réalisé une forme de faisceau tubulaire, plus précisément un faisceau de Bessel à polarisation radiale, qui présente un lobe central de forme d'un cylindre creux, comme présenté en figure d'entête. Cette interaction crée un nano plasma cylindrique, qui isole un nano-pilier de matériau, ici le saphir, qui est poussé à la sortie de l'échantillon grâce aux forces résiduelles de pression [5]. Il est intéressant de noter ici que la couche cylindrique de plasma est extrêmement fine, nous l'estimons à quelques dizaines de nanomètres seulement. Une analyse détaillée par microscopie électronique à transmission nous a permis de confirmer que, sous l'action du laser femtoseconde, en une seule impulsion, un nano-pilier de matière peut être transféré de l'intérieur du matériau vers l'extérieur, sans changer de phase ! Cet effet a été observé pour d'autres matériaux, mais il reste encore un vaste champ d'exploration pour contrôler finement le procédé. Cette découverte ouvre un grand nombre de perspectives pour de multiples applications en photonique, en acoustique, ou encore pour des applications de type micromécanique et d'une manière générale toutes les métasurfaces.

En conclusion, les faisceaux de Bessel, et d'une manière générale les faisceaux non-diffractants ont un vrai impact sur la structuration par laser femtoseconde des diélectriques. Bien que les aspects fondamentaux de l'interaction laser-matière à l'œuvre soient relativement difficiles d'accès aux simulations, (car il s'agit de physique à l'échelle nanométrique, sur des durées s'étendant des femtosecondes jusqu'aux microsecondes, des gammes de température s'étendant de la température ambiante jusqu'à plusieurs dizaines de milliers de kelvins) de nombreuses applications ont vu le jour depuis plus d'une décennie : découpe de verre à très haute vitesse, mais aussi soudure de matériaux transparents, inscription de réseaux de Bragg. Les possibilités offertes par la structuration spatiale voire spatiotemporelle des impulsions femtoseconde, combinée à la structuration en polarisation, ouvrent un champ extrêmement vaste d'exploration pour la structuration des matériaux, en particulier à l'échelle nanométrique pour des effets macroscopiques.

Références

- [1] R. Meyer *et al.*, Appl. Phys. Lett. **114**, 201105 (2019)
- [2] L. Rapp *et al.*, Sci. Rep. **6**, 34286 (2016)
- [3] K. Ardaneh *et al.*, Phys. Plasmas **29**, 072716 (2022)
- [4] A. Mathis *et al.*, Appl. Phys. Lett. **101**, 071110 (2012)
- [5] V. V. Belloni *et al.*, Laser Photonics Rev. **18**, 2300687 (2023)