

Photoinscription de guides d'ondes

Après avoir étudié le micro-usinage de surface au chapitre 6, on s'intéresse ici à un autre champ applicatif de l'interaction d'impulsions ultra-courtes avec la matière : la modification de l'indice de réfraction dans les matériaux diélectriques transparents. Bien que les mécanismes physiques de ces modifications structurales ne soient pas aujourd'hui complètement élucidés, de très nombreuses applications ont vu le jour ces dernières années, avec un accroissement exponentiel des publications à ce sujet depuis 2001 : stockage d'informations [104], réseaux de diffraction [102], guides d'ondes [91, 92, 95, 144-147]. La photoinscription de guides d'onde en volume dans les verres est l'une des applications les plus prometteuses. Du fait même de son origine physique, la modification d'indice est très locale, conduisant à un procédé très précis et relativement souple d'utilisation puisqu'il suffit de contrôler la position du point focal du laser pour graver la structure désirée. Cette technique ouvre donc la possibilité de réaliser de véritables composants d'optique intégrée en trois dimensions [147-149], ce qui était jusqu'à présent inaccessible avec la technologie silicium planaire. Des applications commerciales pourraient ainsi émerger dans les prochaines années, dès que les pertes

des guides d'ondes ainsi fabriqués atteindront des valeurs compatibles avec les exigences des télécommunications.

Afin de contrôler au mieux les structures inscrites, nous nous intéressons dans ce chapitre à la maîtrise des procédés permettant d'inscrire des structures guidantes, en tirant profit de la correction des aberrations du faisceau laser d'inscription, qui autorise notamment un meilleur contrôle de la zone irradiée. Une étude de la morphologie des guides et de leurs propriétés de guidage en lien avec les conditions expérimentales permet de définir les paramètres optimaux, de manière à envisager l'inscription de guides d'onde à section contrôlée grâce à la mise en forme du point focal.

7.1 Revue bibliographique

7.1.1 Principe

Nous avons vu au chapitre 5 que l'irradiation d'un verre par des impulsions femtosecondes conduit à une modification permanente de l'indice de réfraction. En focalisant le faisceau à l'intérieur de l'échantillon transparent, une augmentation locale d'indice est réalisable dans le volume du matériau. Par translation de l'échantillon devant le faisceau, on inscrit ainsi une ligne d'indice supérieur au milieu environnant, qui peut présenter des propriétés guidantes, de la même manière qu'une fibre optique, lorsque les paramètres d'inscription (énergie, focalisation, vitesse de translation) sont précisément ajustés.

Le temps d'évacuation de la chaleur hors de la zone focale étant de l'ordre de 1 μ s, deux régimes de modification d'indice existent : le régime haute cadence (>1 MHz) et le régime basse cadence ($<100-500$ kHz)*. En régime haute cadence, l'inscription est réalisée typiquement avec un oscillateur femtoseconde à faible énergie (80 MHz, quelques nJ) ou un oscillateur à cavité étendue (10-20 MHz) de manière à bénéficier d'une énergie supérieure (10-100 nJ). La modification d'indice provient alors d'une accumulation thermique, le volume focal jouant le rôle d'une source de chaleur locale. A cause de l'isotropie de la diffusion thermique, la zone modifiée est alors à symétrie sphérique et dépend du nombre d'impulsions incidentes. En régime basse cadence, des

* La limite entre les deux régimes est assez floue car les temps de diffusion thermique des différents verres ne sont pas précisément connus.

systèmes amplifiés sont utilisés, délivrant typiquement des impulsions de 1 mJ à 1 μ J selon la cadence (1-100 kHz). Comme le matériau revient à température ambiante après chaque impulsion, l'indice est modifié par des processus de relaxation faisant suite à une forte photo-ionisation. En conséquence, la zone modifiée est confinée au volume focal. Le contrôle de ce volume autorise donc le contrôle de la zone d'augmentation d'indice. Les valeurs des modifications d'indice sont aujourd'hui équivalentes pour les deux régimes.

Parallèlement à ces deux régimes, il existe deux configurations géométriques pour l'inscription de guides d'ondes : l'inscription longitudinale et l'inscription transverse, correspondant un déplacement de l'échantillon parallèlement ou perpendiculairement au faisceau laser (figure 7.1).

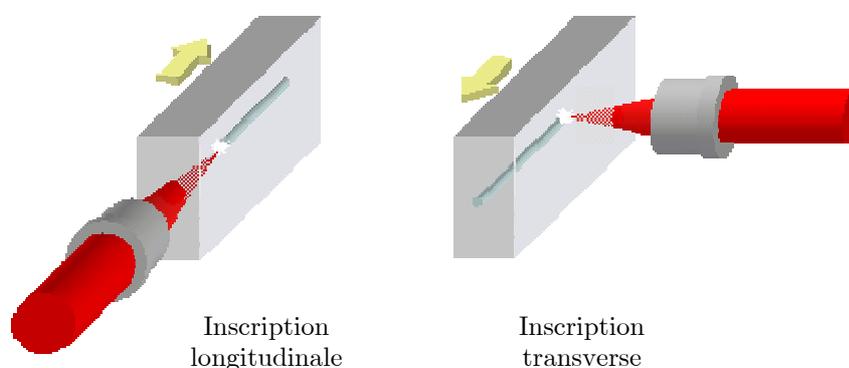


Figure 7.1 – Configurations expérimentales pour la photoinscription de guides d'ondes : inscription longitudinale et inscription transverse. Les flèches jaunes symbolisent la direction de translation de l'échantillon.

En régime basse cadence, l'inscription peut se faire selon les deux géométries [91]. En configuration longitudinale, le guide étant gravé parallèlement à la direction du faisceau, son profil est circulaire grâce à la symétrie de focalisation [92]. En outre, le régime basse cadence présente l'avantage de pouvoir contrôler le diamètre et le profil du guide en contrôlant la taille du point focal. Dans la direction longitudinale, la longueur du guide est limitée par la distance de travail de la lentille ou de l'objectif utilisé. Cependant, grâce à l'utilisation de sources amplifiées, le seuil d'ionisation non linéaire peut être atteint sans focalisation trop drastique. Ceci permet l'utilisation de focales assez longues et d'ouvertures numériques relativement faibles ($ON < 0.5$), la distance de travail (et donc la longueur du guide) peut alors atteindre une échelle centimétrique. Les trois dimensions de l'espace sont ainsi accessibles, autorisant la fabrication de vrais composants 3D, incluant éventuellement des courbes [149]. Des

vitesse de translation typiques de 0.1 à 1 mm/s sont utilisées. Pour s'affranchir de la limitation de longueur des guides, il faut se placer en configuration transverse. En contrepartie, c'est la profondeur qui se trouve alors limitée par la distance de travail de l'objectif utilisé. Mais le principal inconvénient de cette technique est que le profil du guide inscrit n'est pas circulaire car la zone modifiée correspond au volume focal. Celui-ci étant défini par le diamètre à $1/e^2$ du faisceau et la zone de Rayleigh, on obtient alors des guides à section elliptique [146, 147]. Des systèmes dédiés ont été étudiés pour contrer ce problème, avec notamment une focalisation astigmatique [146, 150]. Une troisième configuration récemment découverte peut également être utilisée, dans laquelle l'échantillon est fixe [151]. L'inscription du guide se fait longitudinalement par la propagation d'un filament, confiné spatialement par des effets non-linéaires d'autofocalisation. Pour cela, l'ouverture numérique du faisceau d'écriture doit rester très faible (<0.01), nécessitant des lentilles de grandes focales (7 cm). La longueur et le diamètre du guide sont contrôlés par l'énergie et le nombre d'impulsions. Si cette technique paraît séduisante par sa simplicité de mise en œuvre, elle est cependant limitée à l'inscription de guides rectilignes.

En régime haute cadence, seule la configuration transverse est viable [106, 145, 152, 153]. En effet, à cause des faibles énergies délivrées par de telles sources non amplifiées, une focalisation extrêmement forte ($ON \geq 1$) est requise pour atteindre les fluences permettant d'initier une modification d'indice. Les distances de travail sont alors très réduites ($\sim 200 \mu\text{m}$), interdisant la configuration longitudinale et réduisant du même coup les capacités tridimensionnelles de la photoinscription femtoseconde : les guides ne sont enterrés que de quelques centaines de microns sous la surface, avec une faible gamme de profondeurs accessibles. La longueur des guides est par contre illimitée. L'augmentation d'indice étant provoquée par un effet thermique cumulatif isotrope, des guides à section circulaire sont réalisables [145, 154], dont le diamètre est contrôlé par l'ajustement du couple {cadence, vitesse de translation}. Le profil du guide est donc plus difficilement reproductible puisqu'il dépend du matériau et non du faisceau laser. En contrepartie, le régime haute cadence autorise des vitesses de translation élevées (0.1-20 mm/s), permettant un procédé rapide. Un oscillateur est en outre une source simple et compacte, de coût limité ($\sim 60 \text{ k€}$ contre $\sim 300 \text{ k€}$ pour un système amplifié). Les spécificités de ces différentes configurations expérimentales sont récapitulées dans le tableau 7.1 ci-dessous.

Inscription longitudinale	Inscription transverse	
ON<0.5	ON<1	ON>1
Sources amplifiées basse cadence		Oscillateurs haute cadence faible énergie
Diamètre du guide et profil de mode contrôlés par la taille et la forme du point focal		Régime cumulatif thermique : contrôle du diamètre par la vitesse de translation
Section circulaire	Section elliptique	Section circulaire
Composants 3D dans la masse avec courbes éventuelles Longueur limitée par l'objectif	Composants 3D, possibilité de section circulaire avec des dispositifs spéciaux	Inscription proche de la surface, quasi-2D Longueur illimitée

Tableau 7.1 – Récapitulatif des conditions d'inscription de guides.

7.1.2 Réalisations

Les premiers guides d'ondes inscrits dans les verres par laser femtoseconde ont été réalisés entre 1996 et 1998 par l'équipe japonaise de K. Hirao et K. Miura [91-93, 155]. Depuis 2001, le développement de cette technique ne cesse de s'accroître. De nombreuses équipes de chercheurs s'intéressent aujourd'hui de près à ce sujet. Parmi les plus actifs, on peut notamment citer* :

- en Amérique du Nord : le groupe de E. Mazur à l'université de Harvard [86, 112, 118, 145, 156], celui de E. Ippen au MIT [148, 153, 157], A. Streltsov et N. Borelli (Corning) [95, 152], le groupe de M. Richardson au CREOL [111, 158, 159], de P. Herman à Toronto [119, 120, 160], de D. Krol à l'université Davis [89, 90, 108]

* liste non exhaustive !

- au Japon : les groupe de K. Hirao [91-93, 155], de M. Obara [151, 161, 162], de W. Watanabe et K. Itoh [149, 163, 164]
- en Europe : le groupe de S. Nolte à Jena [96, 99, 147, 165], celui de R. Osellame et G. Cerullo à Milan [106, 146, 150, 154, 166, 167] de J. Solis à Madrid [109, 168]

En France, les premiers guides ont été réalisés au laboratoire TSI [60, 169] et au LOA [170]. La photoinscription de guides d'ondes par laser femtoseconde est un domaine en pleine expansion, qui lie les intérêts de plusieurs communautés scientifiques (lasers ultra-brefs, effets non-linéaires, physique des matériaux et des solides, optique guidée et intégrée). Il n'est donc pas question ici de faire un état de l'art détaillé, mais simplement de mentionner les réalisations les plus marquantes. Celles-ci sont étroitement liées à la configuration géométrique adoptée et au choix du laser d'inscription (systèmes amplifiés ou oscillateur). De manière à disposer d'un outil le mieux adapté possible, les développements laser actuels convergent vers la transition entre les régimes haute et basse cadence, l'objectif étant d'obtenir des impulsions d'énergie élevée à haute cadence (typiquement 1 μ J, 1 MHz).

Après les guides multimodes démontrés par Miura *et al.* [92, 155] puis le premier coupleur Y réalisé en 1999 par Homoelle *et al.* [144], Streltsov et Borrelli [152] réalisent en 2001 un coupleur directionnel par gravure de deux guides parallèles, dont le couplage dépend de leur espacement (quelques microns). Ils démontrent en même temps la possibilité d'inscription à 400 nm avec un laser doublé en fréquence*, ainsi que l'utilisation d'un simple oscillateur femtoseconde au lieu de sources amplifiées. Toutes ces expériences sont réalisées en configuration longitudinale, l'augmentation d'indice est estimée à $\Delta n \sim 10^{-3}$. Schäffer *et al.* [145] testent alors l'inscription transverse à l'oscillateur en cavité étendue (800 nm, 10 nJ, 25 MHz) avec une focalisation extrêmement forte, et réalisent des guides d'ondes à section circulaire résultant d'un effet majoritairement thermique. L'indice est cependant un ordre de grandeur plus faible. L'équipe de Ippen reprend cette technique pour réaliser un coupleur en X [153], un coupleur directionnel et un interféromètre de Mach-Zehnder [157], composants à deux dimensions. En 2002, Will *et al.* [99] étudient l'inscription transverse à basse cadence et montrent que le guide créé a une section elliptique, avec des propriétés multimodes dans la direction allongée. La même équipe développe ce procédé, et

* L'ionisation non-linéaire est alors facilitée puisque deux fois moins de photons sont requis pour l'absorption multiphotonique.

démontre le premier composant 3D : un coupleur 1 vers 3, avec un Δn de 10^{-3} [147]. Afin de s'affranchir du problème d'ellipticité de la section du guide en inscription transverse basse cadence, l'équipe de Cerullo et Osellame a développé un système de focalisation astigmatique [146, 150] permettant d'obtenir des guides à section circulaire.

Utilisant ces différentes techniques, des composants actifs et des composants télécom ont été réalisés. Pour les premiers, on recense des guides fabriqués dans différents types de matériaux transparents : silice pure, dopée au Germanium, verres au borate, silice "soda lime", fluorozirconate (ZBLAN), fluorophosphates, chalcogenides [91, 92], phosphates [108], verres dopés Nd [171], verres à indice élevé dopés aux métaux lourds [109] etc., mais aussi dans les cristaux comme le Ti:saphir [172], LiNbO_3 [173], LiF [174], ou encore dans des matériaux à larges possibilités applicatives comme le PMMA [111] ou le silicium [160]. Des guides à propriétés amplificatrices ont ainsi été réalisés dans des verres au phosphate dopés Er:Yb [166] avec possibilité d'effet laser en plaçant le composant entre deux fibres à réseau de Bragg [154]. Un micro-laser a également été démontré dans un cristal LiF [174], de même que des structures amplificatrices dans la gamme de longueur d'onde télécom [167]. Comme des coupleurs directionnels 3D sélectifs ou non en longueur d'onde [148, 149] et des coupleurs 1 vers N [175] ont également été démontrés, les fonctions télécom de base semblent disponibles. De réelles applications télécom pourraient voir le jour dès que les pertes atteindront des valeurs acceptables (<1 dB/cm). Ceci passe d'une part par la recherche et l'étude de nouveaux matériaux [106] couplées à l'ajustement de la cadence [119] et de la longueur d'onde [120], et d'autre part par la meilleure maîtrise de la zone modifiée. Notamment, l'importance de la correction de l'aberration sphérique a été soulignée tout récemment pour les grandes ouvertures numériques [176], et les études sur le contrôle du volume focal se multiplient depuis quelques mois [177, 178], venant s'ajouter aux travaux italiens [146, 150].

Ainsi, que ce soit pour l'inscription transverse à haute cadence, pour compenser l'ellipticité des guides en géométrie transverse à basse cadence, ou encore pour contrôler le profil du guide et les effets non-linéaires en inscription longitudinale basse cadence, la maîtrise du volume focal semble pouvoir apporter une contribution intéressante. Utiliser un dispositif de mise en forme spatiale du faisceau semble donc être une technique adaptée aux besoins actuels.

7.2 Dispositif expérimental

7.2.1 Montage

Le dispositif expérimental mis en place a été étudié pour permettre à la fois la photoinscription du guide et son analyse directement après inscription. Le montage est exactement le même que pour le micro-usinage de surface, incluant le dispositif de mise en forme du faisceau (*cf.* figure 6.3 du chapitre 6). L'échantillon de verre est maintenu par un système de fixation et de positionnement adapté*, laissant libres quatre faces de l'échantillon pour l'inscription, l'injection, l'analyse du mode guidé (champ proche et champ lointain), la visualisation latérale des dommages et du guide injecté (figure 7.2). Pour cela, deux dispositifs sont insérés autour de l'échantillon de verre :

- un système de visualisation latérale : une source de lumière blanche placée sous l'échantillon permet d'éclairer le guide, qui est alors imagé sur une caméra CCD couleur par l'intermédiaire d'un objectif de microscope $\times 8$. Ce système permet également d'obtenir des images du plasma généré par le faisceau femtoseconde lors de l'inscription, et du guide injecté par un faisceau à 633 nm.
- Un système d'imagerie équivalent au précédent (objectif $\times 40$ et caméra CCD) permet l'analyse en champ proche du mode guidé. En retirant ce système, on observe la répartition de lumière en champ lointain après traversée du guide.

Nous avons inscrit des guides dans des échantillons de silice pure SiO_2 , de dimensions $10 \times 50 \times 20 \text{ mm}^3$. Le choix s'est porté sur le verre Homosil de la société Heraeus ($n=1.45341 \pm 3.10^{-5}$ à 800 nm et $n=1.45711 \pm 3.10^{-5}$ à 633 nm) pour ses bonnes propriétés d'homogénéité et d'isotropie. L'inscription est réalisée dans la masse par l'intermédiaire d'un objectif $\times 8$ ($\text{ON}=0.25$, $f'=25 \text{ mm}$, distance de travail=7 mm) et des impulsions de 130 fs à la cadence de 100 kHz. Le faisceau femtoseconde remplissant toute la pupille de l'objectif, son ouverture numérique est également 0.25, d'où un point focal de 2 μm de diamètre à $1/e^2$ dans l'air lorsque la correction de front d'onde est activée. Il faut cependant tenir compte de l'indice du matériau : les dimensions transverses sont inchangées, tandis que les dimensions longitudinales sont multipliées

* 3 translations (platines motorisées) et 3 rotations (manuelles) indépendantes.

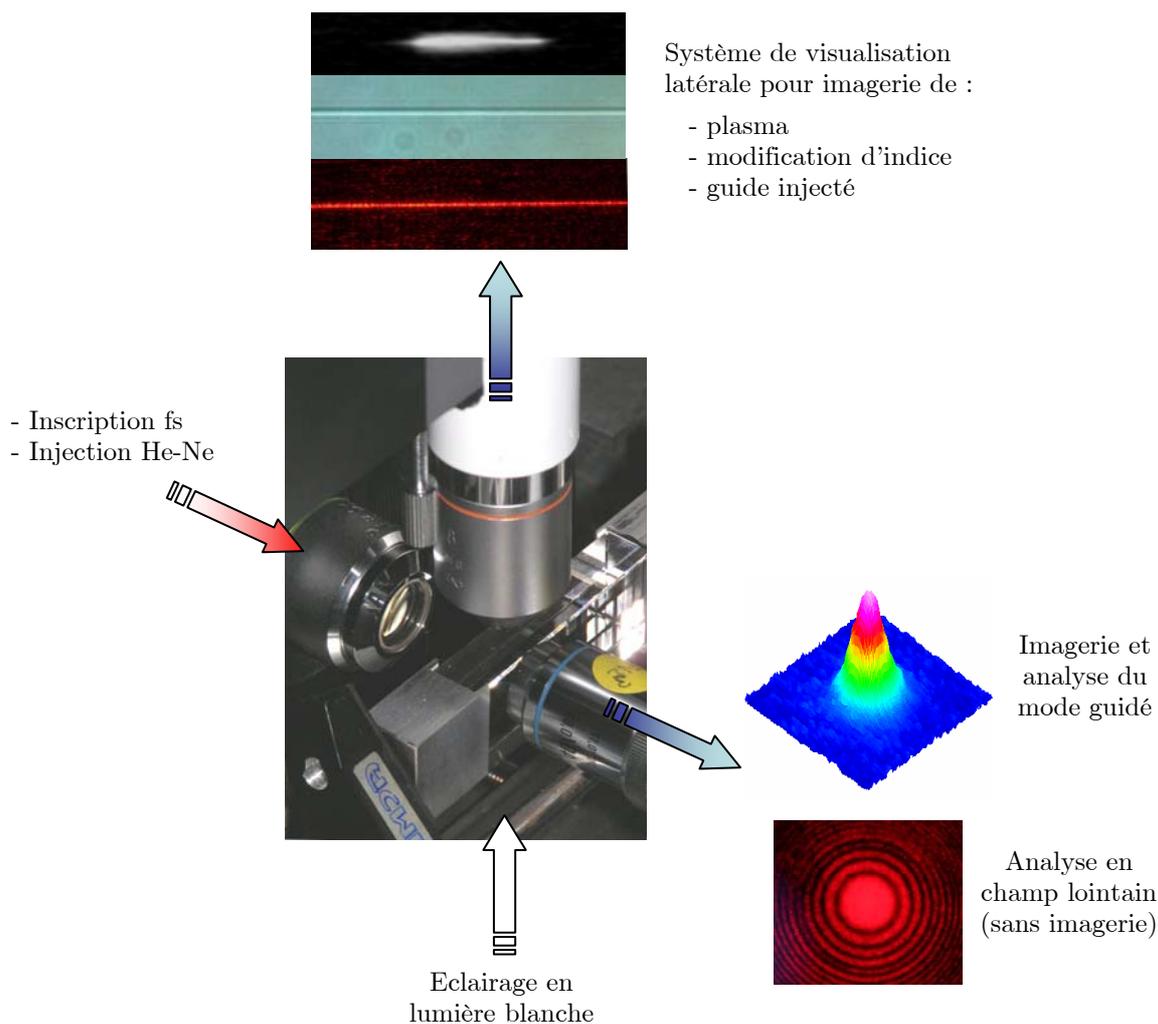


Figure 7.2 – Dispositif expérimental autour de l'échantillon de verre (rectangulaire). A gauche : objectif pour l'inscription femtoseconde et l'injection du guide à 633 nm. En haut : système de visualisation latérale pour l'imagerie du plasma lors de l'inscription, l'imagerie de la morphologie du guide inscrit (avec éclairage en lumière blanche), la visualisation du guide injecté. En sortie du guide (à droite) : analyse du mode guidé en champ proche (imagerie) ou en champ lointain (sans l'objectif).

par l'indice du verre (les détails des calculs correspondants sont reportés en annexe 4). Sans tenir compte des aberrations géométriques ni des effets de propagation et de focalisation non-linéaires éventuels, le volume focal est alors défini par le couple $(2w_0, 2nz_R)$, où w_0 et z_R désignent le rayon à $1/e^2$ (waist) et la distance de Rayleigh du faisceau calculés dans l'air. Pour l'objectif de microscope utilisé, les dimensions du volume focal théorique sont alors de $2 \mu\text{m} \times 12 \mu\text{m}$. De la même façon, à cause de la réfraction à l'interface air-verre, la profondeur d'inscription est multipliée par n (figure 7.3).

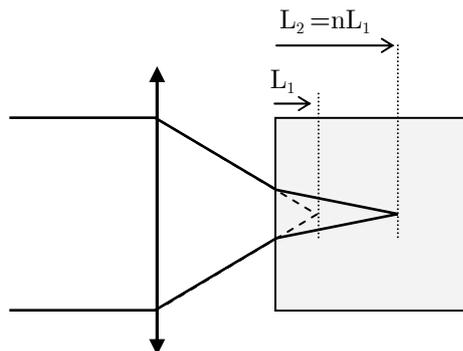


Figure 7.3 – Focalisation dans l'échantillon de verre : la profondeur atteinte est multipliée par l'indice n par rapport à une focalisation dans l'air.

7.2.2 Choix de la configuration d'inscription

7.2.2.1 Inscription transverse

Des études préliminaires en inscription transverse ont été réalisées sur une lame de verre de 1 mm d'épaisseur. Le guide de la figure 7.4 est gravé par des impulsions de 1.5 μJ , 130 fs, 100 kHz avec un objectif $\times 8$ ($\text{ON}=0.25$). Un seul passage est effectué à la vitesse de 10 $\mu\text{m/s}$. Le guide est enterré 500 μm sous la surface et sa longueur est 25 mm. Après l'inscription et le polissage des faces d'entrée et de sortie, l'échantillon doit être tourné de 90° pour injecter le guide avec un laser He-Ne grâce au même objectif de microscope. Le réglage permettant de retrouver le guide et de l'injecter après rotation de l'échantillon est très délicat, étant donné ses faibles dimensions. De plus, comme un polissage a été réalisé, tout repère sur la face d'entrée est impossible. Ceci constitue un inconvénient expérimental important de l'inscription en configuration transverse, qui n'existe pas pour l'inscription longitudinale (injection immédiate après gravure). Le système de visualisation avec éclairage en lumière blanche permet néanmoins de faciliter ce réglage. Sur la photographie de la figure 7.4, le guide injecté est aisément visible à l'œil nu sur toute sa longueur.

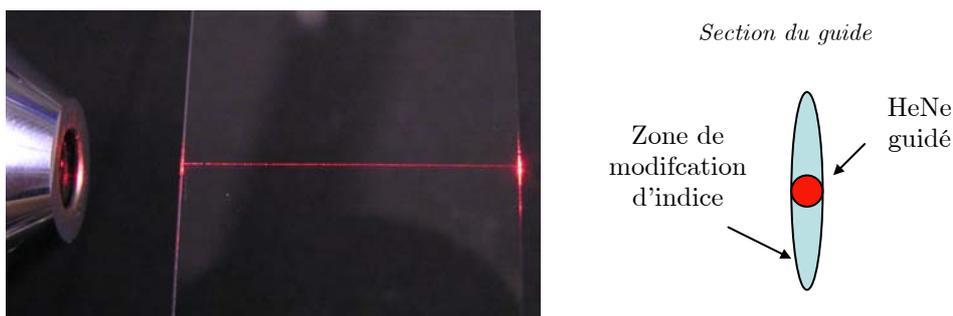


Figure 7.4 – A gauche : photographie d'un guide gravé en géométrie transverse dans les conditions suivantes : 1.5 μJ , 130 fs, 100 kHz, objectif $\times 8$ (ON=0.25), 1 passage à 10 $\mu\text{m/s}$, profondeur 500 μm , longueur 25 mm. A droite : mise en évidence de l'ellipticité de la section du guide.

La forme de la section du guide est déduite des tolérances des réglages d'injection. Celles-ci sont de $\sim 10 \mu\text{m}$ selon la direction horizontale et de $\sim 50 \mu\text{m}$ dans la direction verticale (axe d'inscription), ce qui confirme la forme allongée de la zone modifiée. Will *et al.* [99] et Cerullo *et al.* [146] ont montré que des modes fortement asymétriques, et notamment multimodes dans la direction verticale (TEM_{04}) peuvent se propager dans de tels guides transverse à section elliptique. Le contrôle du point focal ne permettant pas de contrôler la section du guide dans cette configuration d'inscription transverse, nous n'avons pas étudié ce type de guides plus en détail.

7.2.2.2 Inscription longitudinale

En inscription longitudinale, la forme allongée du volume focal n'est plus un problème car elle est dans l'axe du guide. L'avantage évident de cette configuration réside dans le fait que le guide inscrit présente alors une section bien circulaire. De plus, il est ainsi intéressant d'utiliser le dispositif de correction de front d'onde et de mise en forme de tache focale pour contrôler la section du guide. Un échantillon de grandes dimensions permet de graver un grand nombre de guides dans des conditions similaires, comme représenté sur la figure 7.5. En configuration longitudinale, les guides sont inscrits selon la dimension 10 mm pour des raisons de frontale limitée de l'objectif utilisé ($\times 8$, ON=0.25, frontale=7 mm). Une longueur de 9 mm est ainsi atteignable. Un guide est inscrit en focalisant d'abord le faisceau au niveau de la face arrière de l'échantillon puis en le translatant jusqu'à atteindre la face d'entrée. La propagation et la focalisation du faisceau lors de l'écriture ne sont ainsi pas affectées par la partie du guide qu'il vient d'inscrire. Conformément aux calculs de l'annexe 4, le plasma se

déplace dans l'échantillon au cours de l'inscription avec une vitesse multipliée par n par rapport à un point d'observation fixe. La vitesse est constante et le plasma se déplace vers le faisceau.

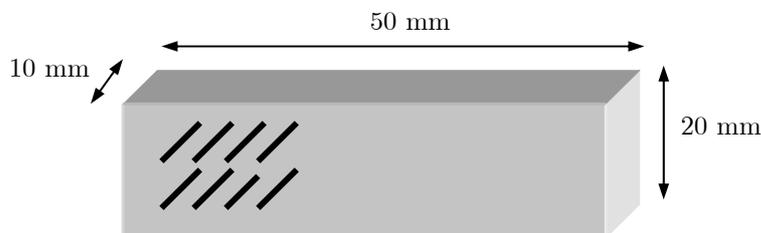


Figure 7.5 – Géométrie des guides dans le bloc de verre (inscription longitudinale).

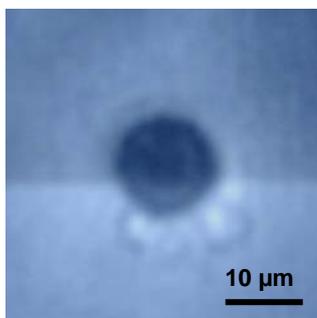


Figure 7.6 – Image de la face avant de l'échantillon lors de l'inscription d'un guide débouchant.

Des guides débouchants ont d'abord été réalisés, c'est-à-dire que la gravure commence et termine en dehors de l'échantillon. Un dommage en surface est alors observé (figure 7.6), alors que seul un changement d'indice est observé dans la masse. Ceci provient du fait que les seuils de dommages sont plus faibles en surface. Notons que la section du dommage est bien circulaire, comme attendu en inscription longitudinale. Cependant, sa taille n'est pas représentative du diamètre du guide car l'énergie est supérieure au seuil de dommage en surface. Ne disposant pas d'un système de polissage performant pour des grandes surfaces, nous avons donc inscrit des guides totalement enterrés en arrêtant la translation de l'échantillon $\sim 200 \mu\text{m}$ sous la surface des faces avant et arrière. Aucune trace en surface n'est alors décelable. En réglant précisément l'alignement du laser He-Ne sur le faisceau femtoseconde, l'injection des guides est immédiate, ce qui constitue un gain de temps très appréciable par rapport à

la configuration transverse. Ceci permet également un contrôle direct du guide immédiatement après gravure. Remarquons que l'étape de coupe et de polissage pour atteindre les guides n'est pas indispensable, il est possible d'injecter directement les guides enterrés (figure 7.7). En première analyse et pour comparaison aux guides gravés transversalement, la tolérance de réglage pour l'injection est de quelques microns sur une zone circulaire.

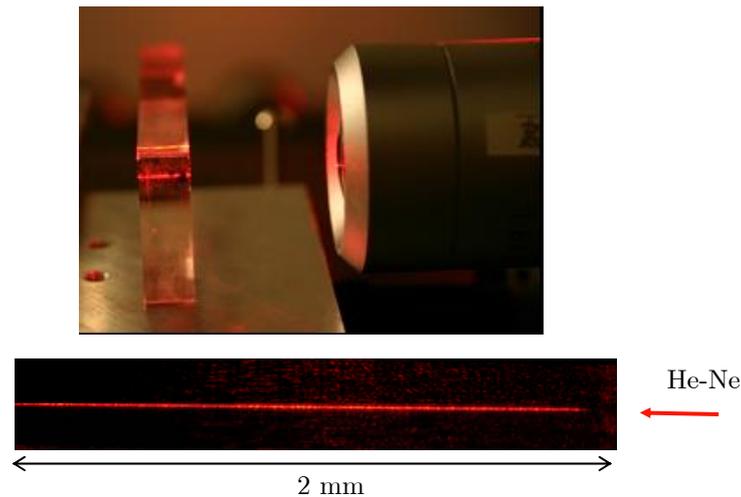


Figure 7.7 – Vues transverses d'un guide enterré inscrit longitudinalement, dans lequel on a injecté la lumière d'un laser He-Ne par focalisation sur le début du guide. La longueur totale du guide est de 9 mm.

En conclusion, après avoir inscrit des guides dans les deux configurations géométriques possibles, nous avons illustré l'intérêt de l'inscription longitudinale, qui offre l'avantage d'obtenir directement des guides à symétrie circulaire, et non elliptique. Dans la suite, nous nous restreignons à cette seule configuration expérimentale afin d'étudier en détail l'influence des conditions expérimentales sur les caractéristiques et les propriétés des guides inscrits. Dans un objectif de contrôle et d'optimisation des procédés de photoinscription, on s'intéresse dans le paragraphe suivant aux effets particuliers lors de la focalisation d'impulsions courtes dans les matériaux transparents.

7.3 Effets à considérer dans le procédé d'inscription

La modification d'indice provient de la recombinaison du plasma d'ions et d'électrons généré dans le matériau par l'irradiation laser. Avant d'étudier la morphologie des structures inscrites, il est utile de s'intéresser aux différents mécanismes qui influent sur les dimensions et les caractéristiques du plasma généré à l'intérieur de l'échantillon de verre, dus à la focalisation et à la propagation non-linéaire des impulsions femtosecondes.

7.3.1 Autofocalisation

L'autofocalisation est un phénomène non linéaire du troisième ordre qui provient de la dépendance de l'indice de réfraction du milieu avec l'intensité laser (effet Kerr) : $n(z) = n_0 + n_2 I(z)$, avec n_2 l'indice non linéaire du verre considéré. A cause des grandes intensités obtenues au point focal (10^{13} - 10^{14} W/cm²), cet effet peut devenir non négligeable et ainsi perturber la focalisation du faisceau dans l'échantillon. En effet, la distribution gaussienne d'intensité du faisceau au point focal engendre une variation spatiale de l'indice. Cette courbure de phase gaussienne agit comme une lentille et provoque une focalisation prématurée du faisceau en amont du point focal géométrique. En conséquence, la longueur de la zone focale est augmentée vers l'avant, couvrant un volume qui englobe le point focal géométrique et le point focal d'autofocalisation (figure 7.8).

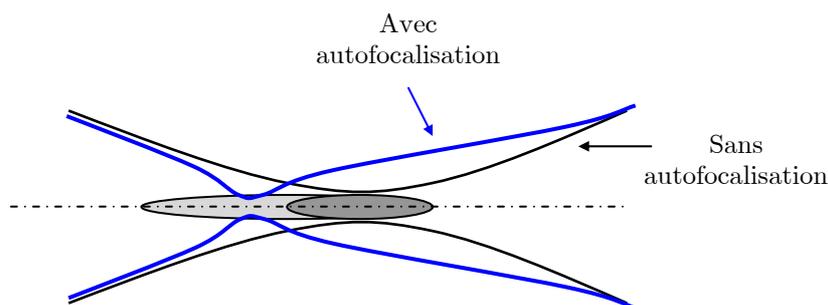


Figure 7.8 – Représentation schématique de l'autofocalisation d'un faisceau gaussien en avant du point focal. En bleu : trajet des rayons lors de l'autofocalisation, qui contribue à allonger la zone focale vers l'avant (gris clair) par rapport à celle obtenue lors d'une focalisation classique (gris foncé). Le faisceau est incident depuis la gauche du schéma.

L'autofocalisation s'observe à partir d'une puissance crête critique donnée par [179] : $P_{cr} = 3.77\lambda^2 / (8\pi n_0 n_2)$. Sa valeur est de 2.2 MW pour nos échantillons de silice*. Dans nos expériences, nous utilisons des puissances crêtes de l'ordre de $P=1 \mu\text{J}/130 \text{ fs}=7.7 \text{ MW}$, nous n'échapperons donc pas à cet effet.

Lorsque la focalisation des impulsions courtes dans le matériau est suffisamment forte pour créer un plasma, on assiste à un phénomène de filamentation. La filamentation résulte de deux effets contraires qui se contrebalancent mutuellement : l'autofocalisation, provoquée par l'effet Kerr optique qui joue le rôle d'une lentille d'autant plus convergente que l'intensité laser I est élevée, et la défocalisation provoquée par le plasma, qui joue le rôle d'une lentille d'autant plus divergente que la densité est élevée [180-182]. Ces deux effets peuvent se compenser pour donner naissance à un filament, caractérisé par un diamètre constant ($\sim 2w_0$) et une grande longueur (plusieurs z_R), qui dépend de l'intensité laser. En effet, comme le verre absorbe l'énergie tout au long du plasma, le filament s'interrompt quand l'intensité du faisceau n'est plus assez forte. La filamentation s'accompagne de la génération d'un continuum de lumière blanche issu de l'automodulation de phase, provoquée elle aussi par l'effet Kerr. Au final, le plasma est de couleur blanche légèrement bleutée. Ceci provient de plusieurs contributions : i) continuum de lumière blanche généré par la filamentation, ii) émission du plasma sur une large bande centrée autour de 450 nm, provenant de la recombinaison électronique [183], iii) lumière à 800 nm provenant de la diffusion du laser femtoseconde.

La figure 7.9 présente les images de plasma réalisées avec deux ouvertures numériques différentes pour focaliser le faisceau femtoseconde, limitées dans un cas par le diamètre du faisceau ($\text{ON}=0.08$ avec $f'=76.2 \text{ mm}$) et dans l'autre par la pupille de l'objectif utilisé ($\text{ON}=0.25$, $f'=25 \text{ mm}$). Les énergies respectives sont $2 \mu\text{J}$ et $0.65 \mu\text{J}$, les temps d'irradiation sont de 1 ns, soit 10^5 impulsions (durée 130 fs).

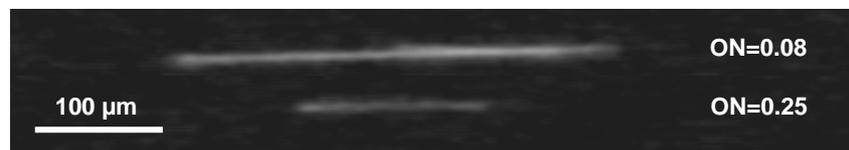


Figure 7.9 – Observation de filaments générés par focalisation d'impulsions femtosecondes dans la silice, pour deux ouvertures numériques : $\text{ON}=0.08$ pour $E=2 \mu\text{J}$ et $\text{ON}=0.25$ pour $E=0.65 \mu\text{J}$. Le faisceau est incident depuis la gauche.

* $\lambda=800 \text{ nm}$, $n_0=1.45341$, $n_2=3 \times 10^{-16} \text{ cm}^2/\text{W}$

La longueur du filament diminue lorsque l'ouverture numérique augmente. Les dimensions des deux plasmas sont reportées dans le tableau 7.2, de même que les dimensions des volumes focaux théoriques correspondants. Une énergie d'impulsion trop élevée par rapport au seuil d'ionisation du matériau peut être à l'origine d'un plasma de dimensions supérieures au volume focal. En l'occurrence, on observe un facteur 2 entre les diamètres des plasmas et les diamètres des volumes focaux. Si aucun effet non linéaire n'avait lieu, on devrait constater également un facteur 2 sur les longueurs des plasmas. Or ceci n'est pas le cas : on obtient des facteurs de 2.5 pour $ON=0.08$ et 10.5 pour $ON=0.25$. Ces observations, similaires à celles réalisées par Yamada *et al.* [163], confirment donc l'intervention d'effets non-linéaires.

ON	0.08	0.25
Longueur du plasma	280 μm	125 μm
Diamètre du plasma	13 μm	5 μm
Longueur $2nz_R$	109 μm	12 μm
Diamètre $2w_0$	6 μm	2 μm

Tableau 7.2 – Dimensions expérimentales et théoriques des plasmas.

7.3.2 Rôle de l'énergie

Afin de connaître les dimensions du plasma pour les différentes énergies utilisées pour l'inscription des guides d'ondes, la figure 7.10 présente l'influence de l'énergie laser sur la taille du plasma créé. Il est à noter que le plasma est très stable et que ces acquisitions sont bien reproductibles. On constate immédiatement que les dimensions du plasma augmentent avec l'énergie. Ceci provient de deux contributions différentes. Tout d'abord, l'augmentation de l'énergie conduit logiquement à dépasser le seuil d'ionisation du matériau dans un volume plus large. Cependant, on remarque que l'accroissement de la taille du plasma n'est pas symétrique de chaque côté du point focal (défini par la position du plasma à faible énergie). L'extension est supérieure en amont du point focal, et ceci de manière d'autant plus marquée que l'énergie est élevée. C'est une conséquence directe de l'autofocalisation.

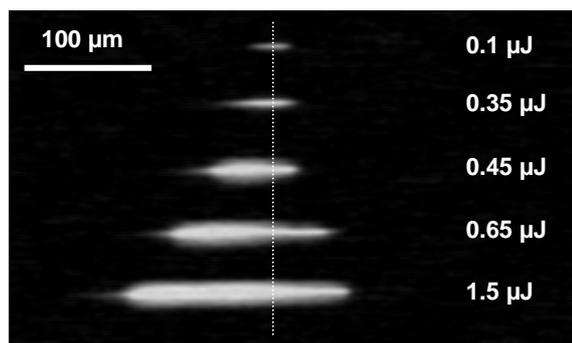


Figure 7.10 – Influence de l'énergie sur la taille et la position du plasma. Le faisceau est incident depuis la gauche, la ligne en pointillés repère la position du point focal géométrique. Les intensités relatives sont respectées. Conditions expérimentales : $ON=0.25$, 130 fs, 100 kHz, 10^5 impulsions, l'énergie utilisée est indiquée à côté de chaque acquisition.

Pratiquement, l'énergie permet donc de contrôler la longueur du plasma créé dans la masse du verre. En tenant compte de cette observation, la vitesse de translation pour l'inscription longitudinale d'un guide doit donc être ajustée en conséquence pour contrôler la quantité d'énergie atteignant un site donné.

7.3.3 Influence du nombre d'impulsions : incubation

Avant de faire intervenir le paramètre vitesse, étudions au préalable l'influence du nombre d'impulsions sur le plasma produit lors d'une irradiation fixe. Le nombre d'impulsions dépend du temps d'irradiation, qui est ajusté ici de 1s à 30s. Les acquisitions sont réalisées pour deux conditions de focalisation différentes : $ON=0.08$ (figure 7.11) et $ON=0.25$ (figure 7.12).

Sur la figure 7.11, on ne note aucune différence entre les plasmas créés par 10^5 et 10^6 impulsions, qui sont en tout point similaires au filament présenté précédemment sur la figure 7.9. A partir de 1.5×10^6 impulsions, un plasma très brillant et beaucoup plus large apparaît. D'après les analyses morphologiques des structures inscrites, qui seront présentées plus loin, un tel plasma engendre systématiquement un dommage sévère du matériau. Ceci se comprend bien dans la mesure où les acquisitions correspondent à la lumière diffusée latéralement : un dommage se comporte comme un centre très diffuseur et sature donc la caméra. Physiquement, ce dommage résulte d'un effet d'incubation (accumulation d'impulsions), qui a déjà été abordé au chapitre 6 lors de l'ablation de

surface. Bien que ce ne soit pas décelable, les impulsions précédentes ont modifié le matériau, dont le seuil est alors abaissé. La même énergie suffit donc à produire un dommage. Ce phénomène est très reproductible, le nombre d'impulsions nécessaires étant identique à chaque fois.

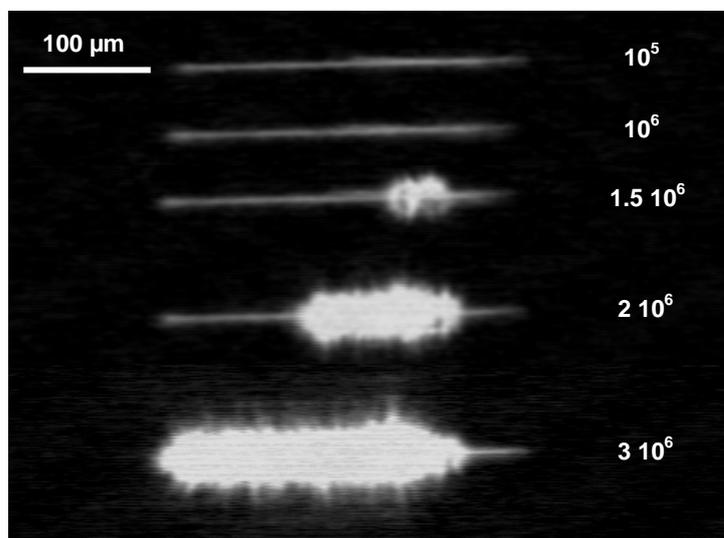


Figure 7.11 – Influence du nombre d'impulsions sur la morphologie du plasma créé. Le faisceau est incident depuis la gauche, les intensités relatives sont respectées. Conditions expérimentales : ON=0.08, 2 μ J, 130 fs, 100 kHz, le nombre d'impulsions est indiqué à côté de chaque acquisition.

D'après des simulations numériques sur la dépendance de la distribution spatiale de l'intensité laser et la densité plasma le long du filament en fonction des conditions de focalisation et d'énergie [184], la densité plasma la plus élevée se trouve à la position du point focal géométrique. Comme ce premier dommage n'est pas localisé au centre du filament, ceci met encore une fois en évidence l'importance du phénomène d'autofocalisation, qui conduit à l'allongement du plasma en amont du point focal géométrique.

Lorsque l'on augmente encore le nombre d'impulsions, le dommage se développe en avant du dommage initial, jusqu'à atteindre toute la longueur du filament situé en avant du point focal. La zone située en arrière n'est pas affectée, quel que soit le nombre d'impulsions incidentes. Nous pouvons avancer l'explication suivante. Lorsque la densité d'électrons libres est suffisamment élevée pour former un plasma critique, l'indice du plasma devient imaginaire pur, c'est-à-dire que le plasma n'absorbe plus l'énergie et devient donc réfléchissant. Les impulsions suivantes sont alors réfléchies en

sens inverse de la propagation du faisceau, et le dommage se développe dans la même direction, sans affecter la partie située après le point focal géométrique. Lorsque toute la partie amont du filament est transformée en un dommage, on observe une saturation, la longueur du plasma très brillant n'augmente plus.

De la même manière, on observe également la coexistence d'un dommage optique et de filamentation pour une ouverture numérique plus élevée (figure 7.12), en accord avec les observations de Nguyen *et al.* [183]. Un effet d'incubation (sensibilité au nombre d'impulsions) est également mis en évidence dans ces échantillons de silice. Ces résultats, contraires aux hypothèses avancées par Saliminia *et al.* [185], sont en revanche cohérents avec les observations des modifications d'indice par microscopie à contraste de phase obtenus par A. Mermillod-Blondin, doctorant dans notre équipe [186]. Enfin, notons que le dommage apparaît d'autant plus rapidement que l'énergie est élevée.

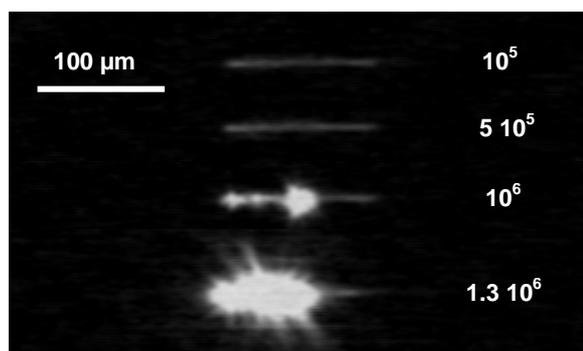


Figure 7.12 – Influence du nombre d'impulsions sur la morphologie du plasma créé. Le faisceau est incident depuis la gauche, les intensités relatives sont respectées. Conditions expérimentales : $ON=0.25$, $0.65 \mu\text{J}$, 130 fs , 100 kHz , le nombre d'impulsions est indiqué à côté de chaque acquisition.

Lors de l'inscription de guides d'ondes, le couple {énergie, vitesse de translation} doit être précisément ajusté pour éviter l'apparition d'un dommage. En d'autres termes, l'énergie et la vitesse constituent deux paramètres interdépendants pour maîtriser l'incubation. Ceci permet de contrôler la morphologie du dommage induit dans le matériau. Dans ces conditions, des structures lisses et uniformes peuvent être obtenues, qui s'avèrent présenter les meilleures propriétés guidantes.

7.3.4 Influence de la profondeur

Un inconvénient de la configuration d'inscription longitudinale provient de la variation de longueur du plasma en fonction de la profondeur de focalisation dans l'échantillon. Dans cette étude de procédé, nous n'avons pas étudié l'origine de ce phénomène, qui pourrait provenir d'une combinaison d'effets non-linéaires [170] et d'aberrations géométriques [176]. En effet, l'objectif utilisé est corrigé des aberrations pour une profondeur standard de 170 μm , correspondant à l'épaisseur des lamelles couvre-objet en microscopie. Pour les épaisseurs de verre traversées ici (jusqu'à 8 mm), l'aberration sphérique peut notamment devenir importante, initiant éventuellement d'autres processus non-linéaires. Des simulations prenant en compte l'ensemble de ces paramètres sont envisagées à l'avenir dans notre groupe.

Comme le montrent les acquisitions de la figure 7.13, le résultat expérimental est une augmentation de la longueur du plasma avec la profondeur de focalisation dans l'échantillon, à énergie constante. Les propriétés du guide inscrit dans ces conditions peuvent donc être différentes d'une extrémité à l'autre du guide, ce qui constitue l'inconvénient principal lié à la géométrie d'inscription longitudinale. Ce point sera détaillé lors de l'analyse morphologique des guides.

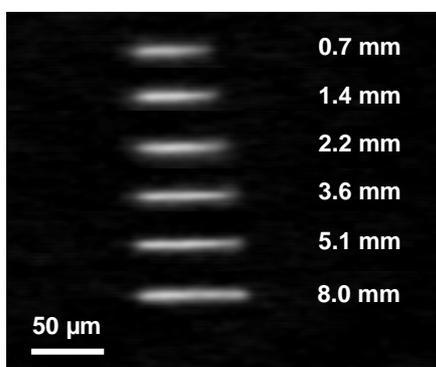


Figure 7.13 – Influence de la profondeur sur la longueur du plasma. Le faisceau est incident depuis la gauche, les intensités relatives sont respectées. Conditions expérimentales : $\text{ON}=0.25$, $0.4 \mu\text{J}$, 130 fs , 100 kHz , 10^5 impulsions, la profondeur de focalisation est indiqué à côté de chaque acquisition.

7.3.5 Conclusion

Nous avons mis en évidence plusieurs effets importants à considérer pour le procédé de photoinscription. Ces effets sont étroitement liés au plasma. Des phénomènes d'autofocalisation, de filamentation et d'incubation interviennent, auxquels viennent s'ajouter les aberrations géométriques, rendant ainsi très délicat le contrôle du plasma, en particulier dans l'axe du laser. Après avoir étudié les caractéristiques du plasma lors d'une irradiation fixe, nous en déduisons que trois paramètres interdépendants doivent être ajustés (focalisation, énergie, vitesse de translation) afin d'éviter le dommage optique. L'observation du plasma constitue alors une méthode de diagnostic extrêmement simple pour déterminer les conditions adéquates d'inscription. Nous présentons dans la suite une étude détaillée des guides gravés par cette technique.

7.4 Photoinscription des guides

7.4.1 Introduction

Afin de déterminer les meilleurs paramètres expérimentaux, une étude systématique sur les conditions expérimentales d'inscription a été menée. Un grand nombre de guides ont été gravés dans le même échantillon de silice. Dans le but de maîtriser les procédés d'inscription, l'influence de l'énergie, de la vitesse de translation et du nombre de passages a été étudiée. Le tableau 7.3 récapitule les valeurs expérimentales choisies, en tenant compte des observations plasma présentées précédemment. Ceci représente quarante-cinq guides de longueur 8.1 mm (début du guide à 1.5 mm de la face d'entrée, fin du guide à 400 μm de la face arrière), inscrits avec un objectif $\times 8$ ($\text{ON}=0.25$, $f'=25$ mm) en configuration longitudinale, avec des impulsions de 130 fs à la cadence de 100 kHz. Ces guides sont tous inscrits avec un faisceau corrigé des aberrations grâce au dispositif d'optique adaptative, afin de contrôler précisément la taille du point focal.

Energie (μJ)	Vitesse ($\mu\text{m/s}$)	Nombre de passages
0.1	10	1
0.5	20	2
0.8	50	4
1.5	100	
	500	

Tableau 7.3 – Etude systématique des conditions d’inscription des guides.

Nous avons mis en place une collaboration avec le laboratoire "Lehrstuhl für Lasertechnik, RWTH" à l’Université de Aachen en Allemagne. Le polissage des échantillons ainsi que l’analyse morphologique des guides a été réalisée à Aachen [187]. Les paragraphes qui suivent s’intéressent à la morphologie de la zone modifiée et relient les paramètres expérimentaux aux caractéristiques et aux propriétés guidantes des structures inscrites.

7.4.2 Morphologie des guides

Pour l’inscription, nous avons adopté un objectif $\times 8$, $\text{ON}=0.25$, $f'=25$ mm, frontale=7 mm. Les autres paramètres expérimentaux à ajuster sont donc l’énergie et la vitesse de translation, qui contrôlent l’incubation. Les photographies des guides présentées dans cette section ont été réalisées en Allemagne grâce à un microscope de Nomarsky. Ces résultats permettent de faire avancer la maîtrise des procédures de photoinscription, mettant en évidence les compromis à réaliser pour déterminer les paramètres optimaux pour la gravure des guides.

Plasma et morphologie du guide

La morphologie des structures inscrites dépend fortement du couple {énergie, vitesse de translation}. La figure 7.14 présente l’influence de l’énergie sur la morphologie du guide inscrit, à vitesse de translation constante. Une vitesse de $10 \mu\text{m/s}$ permet de faire apparaître différents régimes. Avec une énergie de $0.1 \mu\text{J}$, aucune

modification du matériau n'est observée. En augmentant l'énergie, on obtient successivement une structure continue et lisse ($0.5 \mu\text{J}$), puis une structure discontinue et craquelée ($0.8 \mu\text{J}$), et enfin une structure fortement endommagée ($1.5 \mu\text{J}$). Afin de relier la morphologie des structures gravées aux mécanismes, il faut observer le plasma correspondant lors de l'inscription. A vitesse constante et faible, c'est l'énergie qui régit l'apparition ou non d'un dommage : le plasma est lisse et fin pour $0.5 \mu\text{J}$, il est large, inhomogène et très lumineux au delà. Un dommage est donc généré, qui s'observe effectivement sur les traces de la figure 7.14.

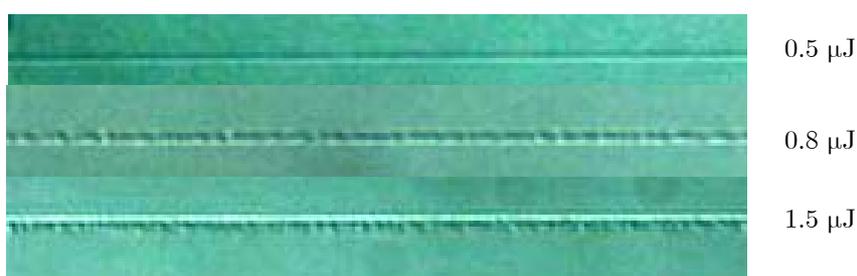


Figure 7.14 – Influence de l'énergie sur la morphologie du guide, à vitesse de translation constante. Conditions expérimentales : $\text{ON}=0.25$, 130 fs , 100 kHz , 1 passage, $10 \mu\text{m/s}$.

Concernant l'influence de la vitesse de translation, la figure 7.15 montre les différentes structures obtenues à énergie constante ($1.5 \mu\text{J}$). A vitesse lente ($10 \mu\text{m/s}$), on obtient une trace irrégulière et craquelée, tandis qu'à vitesse légèrement supérieure ($20 \mu\text{m/s}$), une trace uniforme et homogène est observable. Quand on augmente la vitesse, la trace garde la même morphologie. Comme précédemment, un plasma beaucoup plus intense, caractéristique d'un dommage, est observé lors de l'inscription du guide à $10 \mu\text{m/s}$.



Figure 7.15 – Influence de la vitesse de translation sur la morphologie du guide, à énergie constante. Conditions expérimentales : $\text{ON}=0.25$, $1.5 \mu\text{J}$, 130 fs , 100 kHz , 1 passage.

En conclusion, la transition d'une structure irrégulière et discontinue à une structure lisse et homogène est bien nette, permettant d'ajuster précisément le couple {énergie, vitesse de translation}. Il existe une corrélation directe entre la morphologie du plasma et la qualité du guide inscrit : un plasma provoquant un dommage conduit à un guide craquelé, alors qu'un plasma lisse permet d'inscrire un guide homogène si l'énergie est suffisamment élevée.

Influence de la profondeur

En configuration d'inscription longitudinale, un problème spécifique apparaît, à cause des différences d'épaisseur de verre traversées entre le début et la fin du guide. En effet, nous avons vu que la longueur du plasma créé dans le verre par les impulsions laser augmente avec la profondeur de focalisation dans l'échantillon. Nous en étudions ici les conséquences sur les guides inscrits.

Le graphique de la figure 7.17 résume les résultats expérimentaux de longueur du plasma en fonction de la profondeur de focalisation dans l'échantillon. Comme le seuil de dommage est uniforme dans tout l'échantillon, le contour du plasma correspond à la fluence seuil de modification du matériau. A partir de cette hypothèse, le paramètre pertinent pour décrire la quantité d'énergie déposée dans le matériau est la densité volumique d'énergie (J/cm^3), calculée à partir du volume du plasma correspondant. Ce paramètre est également tracé en fonction de la profondeur sur le même graphique. C'est un paramètre macroscopique certes très approché, mais qui permet de dégager un comportement. On constate que la morphologie de la modification induite dans le verre y est très sensible. En effet, à énergie et vitesse de translation fixées ($1.5 \mu\text{J}$ et $20 \mu\text{m}/\text{s}$), deux types de dommages différents sont observés selon la profondeur. Pour une densité d'énergie inférieure à $\sim 5 \text{ kJ}/\text{cm}^3$, une structure lisse et bien continue est obtenue. Au delà de cette valeur, on inscrit une ligne craquelée et non uniforme, résultant d'un dommage plus sévère.

Selon la vitesse de translation, la transition entre les deux régimes est plus ou moins marquée (figure 7.18), permettant de mesurer le seuil de densité volumique d'énergie en mesurant la profondeur à laquelle a lieu la transition. Dans les conditions expérimentales adéquates, des guides lisses sur toute leur longueur (8.1 mm) peuvent être inscrits, comme présenté sur la figure 7.19.

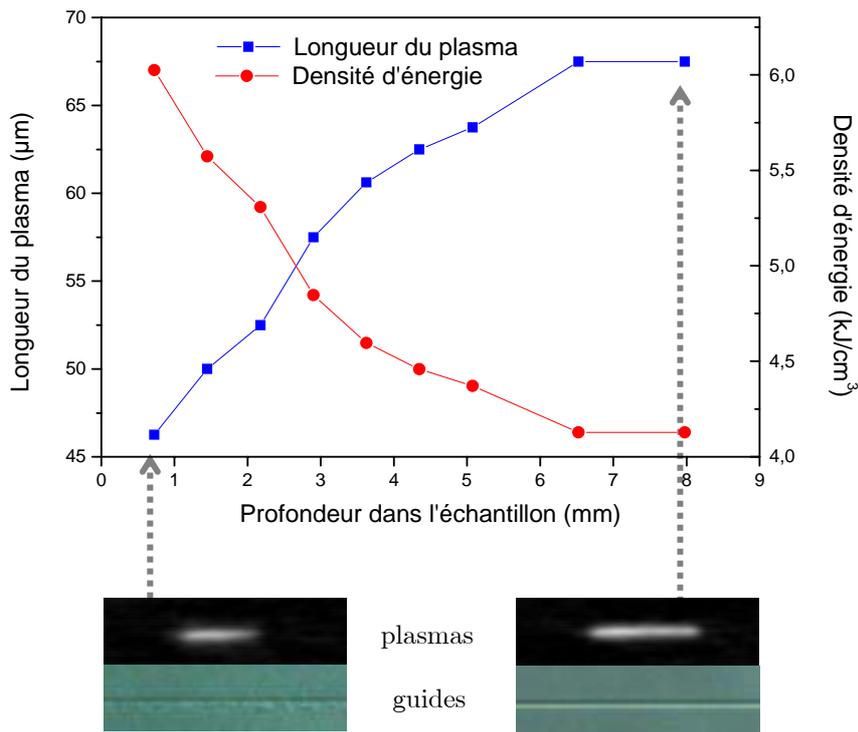


Figure 7.17 – Influence de la profondeur de la position de focalisation sur la longueur du plasma généré en inscription longitudinale. Les densités d'énergie volumiques correspondantes sont également représentées. Les deux plasmas extrêmes sont représentés sous le graphique, ainsi que les guides correspondants inscrits par 1 passage à 20 µm/s. Conditions expérimentales : ON=0.25, 1.5 µJ, 130 fs, 100 kHz.



Figure 7.18 – Transition entre les deux régimes d'inscription (lisse ou craquelé), dont la netteté dépend de la vitesse de translation. Conditions expérimentales : ON=0.25, 1.5 µJ, 130 fs, 100 kHz, 1 passage.



Figure 7.19 – Images mises bout-à-bout des différentes parties du guide : début (à gauche, 1.5 mm sous la surface), milieu, et fin (à droite, 9.6 mm de profondeur). L'inscription se fait depuis la gauche de l'image, en commençant par la fin. Le guide est lisse sur toute sa longueur. Conditions expérimentales : ON=0.25, 130 fs, 100 kHz., 1.5 µJ, 1 passage à 500 µm/s.

Relation morphologie/propriétés guidantes

Nous étudions ici l'influence de la morphologie des structures inscrites sur les propriétés de guidage associées. La lumière d'un laser He-Ne est injectée dans chacun des deux types de guides que nous avons gravés : structure lisse ou endommagée (figure 7.20). Grâce à un système d'imagerie, on observe la lumière latérale diffusée.

La structure homogène assure un bon guidage de la lumière injectée, avec une répartition régulière tout au long du guide. Le profil correspondant (coupe verticale) est une distribution gaussienne. A l'opposé, la diffusion latérale est beaucoup plus importante avec le guide craquelé. Deux coupes sont réalisées en deux positions différentes le long du guide, exhibant des intensités et des largeurs très différentes. En effet, la succession de dommages joue le rôle de centres diffuseurs pour la lumière guidée, introduisant de fortes pertes de manière irrégulière. Ainsi, seules les structures régulières, continues et homogènes assurent un guidage correct de la lumière injectée.

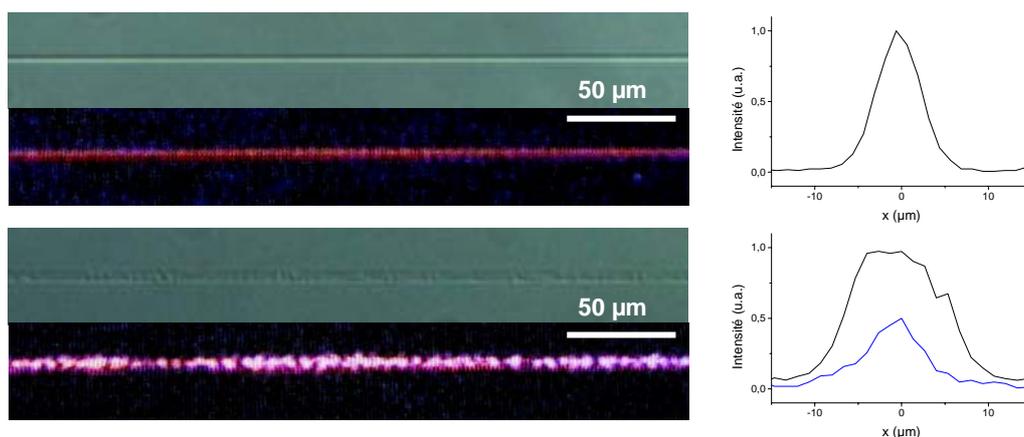


Figure 7.20 – Images d'un guide lisse (en haut) et d'un guide craquelé (en bas) avec injection d'un faisceau à 633 nm, dont la lumière est couplée par la gauche avec un objectif $\times 20$, $ON=0.3$. A droite, sont représentés les profils latéraux de la lumière guidée : gaussienne pour le guide lisse, profil très variable selon la position pour le guide craquelé (2 acquisitions en 2 endroits différents).

Conclusions

La morphologie des guides inscrits par laser femtoseconde est hautement dépendante de la quantité d'énergie déposée dans l'échantillon. Celle-ci est contrôlée par l'ajustement des paramètres interdépendant que sont l'énergie et la vitesse de translation. Les études que nous avons réalisées à 100 kHz dans la silice sont récapitulées sur le schéma de la figure 7.21. Trois régions sont identifiables. A énergie trop faible, aucune modification du matériau n'est détectée (Région 1). Lorsque l'on augmente l'énergie, la morphologie de la modification induite dépend de la vitesse de translation. Si cette vitesse est faible, une quantité d'énergie trop importante est déposée, provoquant un dommage qui conduit à des traces irrégulières et discontinues. La structure formée présente alors de mauvaises propriétés de guidage de la lumière (Région 3). En revanche, une vitesse suffisamment élevée permet d'inscrire des guides réguliers et bien homogènes, qui offrent de bonnes caractéristiques guidantes (Région 2). Entre ces deux régions, il existe un régime intermédiaire où les influences conjointes des effets non linéaires et des aberrations longitudinales peuvent conduire à la création d'une structure craquelée proche de la surface, et lisse en profondeur. C'est probablement la limitation la plus importante de la configuration d'inscription longitudinale. Cependant, la région 2 offre la possibilité de graver de bons guides sur toute leur longueur, dont les caractéristiques sont étudiées ci-après.

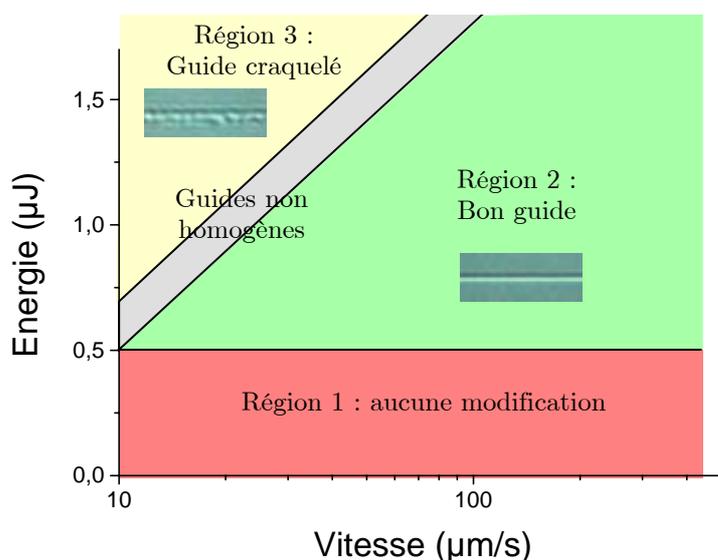


Figure 7.21 – Schéma récapitulatif de la morphologie des guides inscrits. Région 1 : aucune modification car l'énergie est trop faible. Région 2 : inscription d'un guide homogène et régulier. Région 3 : guide craquelé à cause d'une trop grande quantité d'énergie déposée dans l'échantillon.

7.4.3 Diamètre des guides

Après avoir identifié les conditions à satisfaire pour obtenir de bons guides, nous étudions parmi ceux-ci l'influence des paramètres expérimentaux sur le diamètre des guides inscrits. Celui-ci est mesuré par deux techniques différentes : en volume (figure 7.22.a) ou en surface* (figure 7.22.b). Les mesures sont effectuées chacune selon deux directions puis sont moyennées.



Figure 7.22 – Deux techniques de mesure du diamètre du guide : (a) en volume, (b) en surface.

Influence de l'énergie

La figure 7.23 présente l'influence de l'énergie des impulsions d'écriture sur la taille du guide inscrit. Les mesures sont réalisées pour 1 passage et pour des vitesses de 10 $\mu\text{m/s}$ à 500 $\mu\text{m/s}$, les diamètres sont compris entre 1.6 μm et 5.5 μm . Un exemple d'acquisition est donné sur la figure 7.24. On constate une augmentation linéaire du diamètre du guide avec l'énergie (ajustements numériques en pointillés). Il est intéressant de noter que des guides de diamètre inférieur à la dimension du faisceau (2 μm , limité par diffraction) sont réalisables, par simple ajustement de l'énergie. Ceci rejoint les remarques sur le micro-usinage de surface, où l'on mentionne qu'un trou de diamètre inférieur à la limite de diffraction peut être obtenu en faisant en sorte que seul le sommet de la gaussienne excède la fluence seuil du matériau. Ce résultat est atteignable car les effets thermiques dans la zone environnante sont réduits, ce qui a été prouvé en surface sur les métaux pour un usinage à faible cadence (1 kHz) [78]. De la même manière, nous mettons ici en évidence une zone affectée thermiquement très limitée ($<1.5 \mu\text{m}$) dans la masse d'un échantillon de silice irradié à 100 kHz, en accord avec d'autres études [119, 188]. Ceci signifie également que pour ce matériau, la limite entre le régime basse cadence et haute cadence se situe au delà de 100 kHz, ce qui n'est pas le cas pour tous les verres, notamment pour les borosilicates [188]. Bien que le

* Comme les guides sont totalement enterrés, l'échantillon a été préalablement coupé et poli pour réaliser les mesures en surface.

dépôt d'énergie dans la silice soit moins efficace [95] à cause d'un gap deux fois supérieur (9.1 eV contre 4 eV) rendant les processus d'excitation non-linéaires plus difficiles, la silice pure est un matériau intéressant pour l'inscription de guides à section précisément contrôlée, grâce à la bonne adéquation entre la forme du faisceau et la forme du guide inscrit. Par analogie avec l'usinage de surface, il semble possible de rendre indépendants le diamètre du guide et l'amplitude de la variation d'indice en utilisant un faisceau à répartition top-hat. En effet, la valeur du Δn dans la masse du matériau est l'équivalent de la profondeur pour l'usinage de surface, puisqu'ils augmentent tous les deux avec l'énergie incidente [155, 189]. Comme pour les métaux, le profil du guide pourrait donc être contrôlé grâce à la mise en forme de tache focale, l'amplitude de la modification d'indice dépendrait alors de la quantité d'énergie déposée dans le matériau.

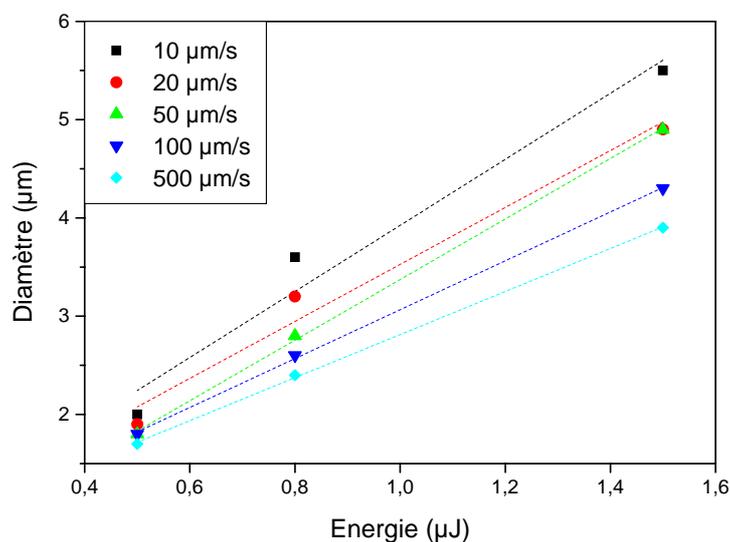


Figure 7.23 – Influence de l'énergie sur le diamètre du guide pour les différentes vitesses de translation (1 passage). Les ajustements numériques linéaires sont tracés en pointillés, la pente moyenne est $2.8 \mu\text{m}/\mu\text{J}$.



Figure 7.24 – Influence de l'énergie sur le diamètre des guides, à vitesse constante ($20 \mu\text{m}/\text{s}$, 1 passage)

Influence de la vitesse

La quantité d'énergie déposée dépend du nombre d'impulsions atteignant un site donné, c'est-à-dire de la vitesse de translation, à énergie fixée. La figure 7.25 présente l'influence de la vitesse d'inscription sur le diamètre du guide. Les mesures sont réalisées pour 1 passage à la cadence laser de 100 kHz. On constate une décroissance du diamètre quand la vitesse augmente. Les courbes sont similaires pour les trois énergies testées. A faible énergie, le diamètre varie cependant très peu.

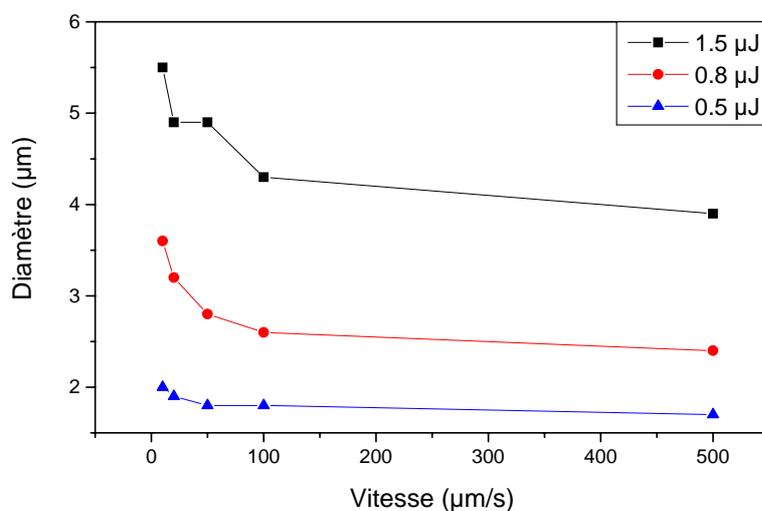


Figure 7.25 – Influence de la vitesse de translation sur le diamètre du guide pour les différentes énergies utilisées (1 passage).

Influence du nombre de passages

Enfin, le dernier paramètre que nous avons étudié est le nombre de passages. De même que pour l'énergie, la loi de variation du diamètre du guide est linéaire (figure 7.26). Les ajustements numériques correspondants sont bons. Plus la vitesse est élevée, moins l'effet du nombre de passages est sensible, ce graphique est donc tracé pour une vitesse de translation de $20 \mu\text{m/s}$.

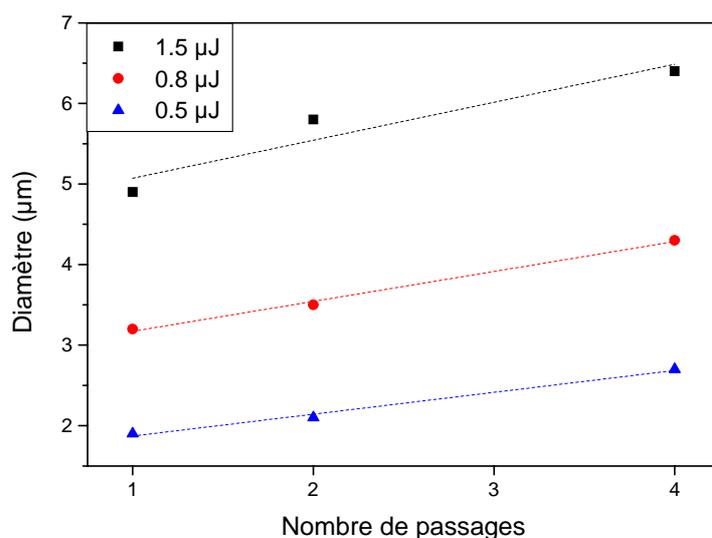


Figure 7.26 – Influence du nombre de passages sur le diamètre du guide pour les différentes énergies d'inscription (vitesse de translation fixée à $20 \mu\text{m/s}$). Les ajustements numériques linéaires sont tracés en pointillés.

Remarque : Influence de la polarisation

La section des guides semble elliptique dans la direction parallèle à la polarisation laser incidente. Cette observation est similaire à celle de Yamada *et al.* [164], et rejoint d'autre part les constatations effectuées lors de l'usinage de surface, que ce soit concernant la circularité du trou [60] ou sur l'influence de la polarisation sur l'orientation des ripples générés sur les flancs du trou (*cf* paragraphe 6.6). Cependant, de plus amples études sont nécessaires pour tirer des conclusions. Il serait par exemple intéressant de réaliser des expériences avec différentes orientations de polarisation, mais également avec une polarisation circulaire ou elliptique, ou même avec une polarisation rectiligne tournante pour moyenniser les effets. Si cette ellipticité s'avère effective et si le rapport d'ellipticité est contrôlable (il semble augmenter avec le nombre de passages, voir figure 7.27) et d'amplitude suffisamment forte, il serait même envisageable de tirer profit de cette propriété pour compenser l'ellipticité de la section de guides inscrits à basse cadence en configuration transverse. Parallèlement, l'étude de l'importance de la modification d'indice avec la polarisation du laser d'écriture (anisotropie) pourrait également être envisagée, de même que l'étude d'éventuelles propriétés de biréfringence lors de la propagation de lumière polarisée dans de tels guides.

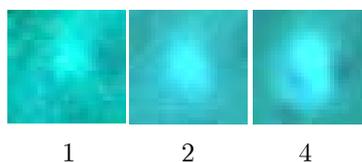


Figure 7.27 – Influence du nombre de passages sur l'ellipticité des guides (vues de la surface pour 1,2,4 passages).

Conclusions

Cette étude systématique du diamètre des guides en fonction des paramètres d'inscription montre que celui-ci peut être contrôlé précisément en ajustant les conditions d'écriture. Les résultats sur la dépendance avec l'énergie indiquent que les effets thermiques sont très limités dans la silice à la cadence utilisée. En effet, par rapport au régime d'inscription à haute cadence ($> \text{MHz}$) où le diamètre minimum du guide est imposé par la longueur de diffusion thermique ($\sim 10 \mu\text{m}$), il est ici possible d'atteindre des diamètres de guides inférieurs à la taille du point focal limité par diffraction. De la même manière que pour l'ablation de surface, la correspondance entre le diamètre du guide et celui du faisceau est obtenue en réglant la quantité d'énergie déposée par l'intermédiaire des paramètres interdépendants que sont l'énergie et la vitesse de translation. Le diamètre diminue si l'énergie diminue et si la vitesse augmente. Il augmente avec le nombre de passages. Cette maîtrise des dimensions du guide par ajustement des paramètres expérimentaux d'inscription permet d'obtenir de façon logique le guide le plus fin ($1.2 \mu\text{m}$) pour l'énergie la plus faible associée à la vitesse la plus élevée ($0.5 \mu\text{J}$, $500 \mu\text{m/s}$) avec un seul passage. Le guide le plus large mesure $7.4 \mu\text{m}$, obtenu à énergie maximale, vitesse minimale et 4 passages.

7.4.4 Propriétés guidantes

Ce paragraphe est consacré à la caractérisation des propriétés guidantes des structures inscrites, grâce à une double analyse de la lumière guidée : en champ lointain (mesure de l'ON et déduction de l'indice) et en champ proche (mode guidé).

Injection de lumière

Pour injecter la lumière d'un laser He-Ne dans les guides inscrits, il faut adapter au mieux l'ouverture numérique d'injection à celle du guide. Dans le même temps, il faut également ajuster la taille du point focal au diamètre du guide. Un compromis est donc à trouver entre ces deux exigences. Nous avons utilisé le même objectif de microscope que celui utilisé pour l'inscription ($\times 8$, $\text{ON}=0.25$). Avec un faisceau He-Ne

de rayon 1 mm, on obtient une ouverture numérique d'injection de 0.04 pour un point focal de diamètre 10 μm .

Pour effectuer le réglage correct de l'alignement du faisceau sur le guide, on observe la lumière en champ lointain après traversée du bloc de verre. Des acquisitions typiques sont représentées sur les photographies de la figure 7.28. De gauche à droite, on observe successivement : (a) la lumière traversant l'échantillon dans une zone ne contenant aucun guide, (b) des effets de diffraction lorsque l'on s'approche du guide, (c) l'augmentation de la taille de ces franges quand le réglage s'améliore, (d) une injection partielle de la lumière dans le guide, et (e) un bon alignement avec un maximum d'énergie couplée dans le guide (zone centrale brillante).

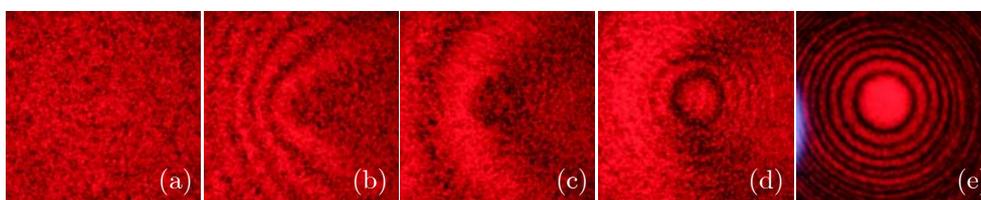


Figure 7.28 – Procédure d'alignement de l'injection de la lumière à 633 nm par observation en champ lointain. (a) : zone sans guide, (b) et (c) : diffraction à l'approche du guide, (d) : injection partielle, (e) : bon alignement.

Ce réglage est effectué par translation (3 axes) et rotation (3 axes) de l'échantillon. L'ajustement est très délicat, avec une tolérance d'injection de quelques microns. Pour faciliter l'alignement, on réalise simultanément une observation transverse du guide injecté. Le réglage de l'injection est optimisé quand le guide est le plus brillant possible, ce qui correspond effectivement à l'observation de la photographie 7.28.e en champ lointain. On voit alors apparaître un système d'anneaux bien contrastés, qui diffèrent des franges de diffraction observées sur la photographie 7.28.b. Les deux systèmes coexistent d'ailleurs sur la figure 7.28.d, montrant que les anneaux observés ne proviennent pas de la diffraction de la lumière par le guide. Leur origine est discutée un peu plus loin.

Analyse en champ lointain : ouverture numérique et indice

L'ouverture numérique des guides inscrits repose sur la même définition que celle de l'ON d'une fibre optique, n_2 et n_1 désignant respectivement les indices de cœur et de gaine. Lorsque la différence des indices $\Delta n = n_2 - n_1$ est faible, on peut faire l'approximation suivante :

$$\text{ON} = \sqrt{n_2^2 - n_1^2} \square \sqrt{2n \times \Delta n} \quad (7.1)$$

La mesure de l'ouverture numérique permet donc d'en déduire le Δn , et vice-versa. Plusieurs techniques ont été testées dans la littérature, comme par exemple la tomographie optique cohérente [153], l'holographie numérique [106], l'attaque chimique suivie d'une analyse de surface [111], les calculs de propagation inverse du mode de sortie [149, 152]. La technique la plus simple et la plus performante à l'heure actuelle est la profilométrie réfractive en champ proche [147] réalisée par un profilomètre commercialisé par Rinck Elektronik en Allemagne. Ne disposant pas de tels systèmes, nous avons utilisé la technique la plus simple (mesure de l'ON en sortie). Le principe consiste à laisser diffracter le mode de sortie après le guide et à mesurer le rayon de la zone éclairée à différentes distances en champ lointain (figure 7.29). L'ouverture numérique se calcule alors par l'expression suivante :

$$\text{ON} = \sin \left(\arctan \left(\frac{r}{d} \right) \right) \quad (7.2)$$

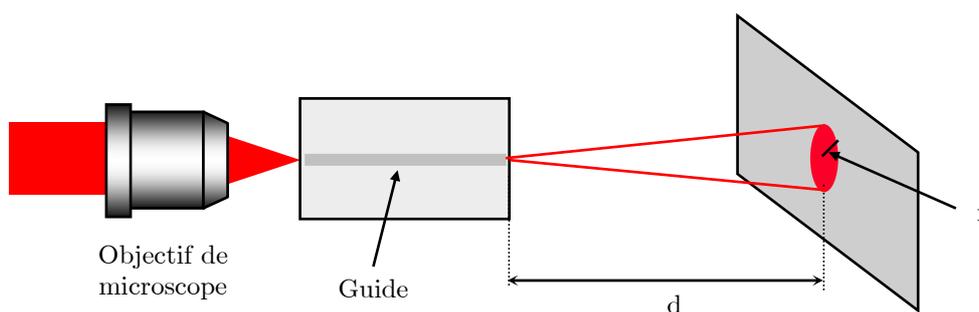


Figure 7.29 – Dispositif expérimental pour mesurer l'ouverture numérique du guide en champ lointain.

L'inconvénient de cette technique réside dans le fait que la distribution d'intensité en champ lointain n'est pas uniforme comme pour une fibre optique, mais s'organise sous la forme d'anneaux concentriques, déjà observés sur la figure 7.28.e. Ce phénomène est mentionné dans la littérature et interprété comme étant des anneaux d'interférence, mais des explications discordantes sont avancées. Selon Homoelle *et al.* [144], ces anneaux pourraient provenir de l'interférence entre la lumière guidée et la lumière non couplée dans le guide*. Miura *et al.* expliquent l'origine de ces anneaux comme étant

* A la différence du guidage dans une fibre optique, la lumière non couplée se retrouve en sortie après avoir traversé l'échantillon.

l'interférence entre plusieurs modes guidés lors d'un fonctionnement multimode [92, 155]. Pour preuve, ces interférences disparaissent en grande partie lorsque la longueur d'onde de la lumière injectée augmente, permettant ainsi de mesurer une fréquence de coupure aux alentours de 800 nm. Cependant, dans notre cas, tous les guides sont monomodes au vu de leur faible diamètre et des valeurs de la fréquence normalisée V calculées plus loin. Nous proposons donc une explication basée sur l'interférence entre le mode guidé fondamental et les modes radiatifs. Ces modes radiatifs correspondent à l'énergie injectée dans le guide avec une ouverture numérique supérieure à celle du guide [190]. Ne pouvant se propager dans le guide, cette énergie est évacuée hors du cœur du guide durant les premières dizaines de microns et se retrouve en sortie où l'on observe alors des interférences avec la lumière guidée. Les anneaux sont donc observés sur la zone de recouvrement entre la lumière provenant des modes radiatifs et la lumière provenant du mode guidé, correspondant au diamètre éclairé par l'ouverture numérique du guide. Pour mesurer l'ouverture numérique en sortie, nous mesurons donc le rayon qui correspond à la disparition des anneaux. On peut remarquer au passage que ces anneaux sont bien circulaires, alors que des anneaux elliptiques sont observés en configuration d'inscription transverse [185].

La précision de cette technique laisse à désirer à cause de la difficulté à estimer l'extension de la zone d'interférences (erreur $\sim 30\%$). En outre, l'interfrange et la répartition d'intensité des anneaux change suivant les guides, comme illustré sur la figure 7.30. On observe même parfois un anneau sombre au centre. Ceci pourrait certainement procurer des informations supplémentaires pour relier les propriétés des guides aux conditions d'inscription, à condition de disposer par ailleurs d'un autre moyen pour assurer une mesure fiable de l'indice des guides. La mise en place d'une collaboration avec le laboratoire "Istituto di Fotonica e Nanotecnologie" à Milan est en cours actuellement.

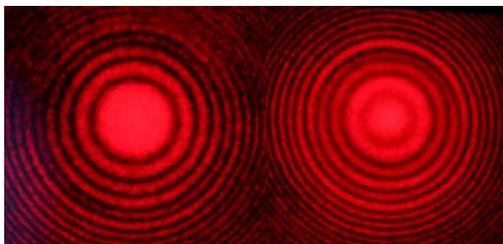


Figure 7.30 – Exemples d'anneaux d'interférence en champ lointain.

Avec cette technique, les résultats obtenus ne permettant pas de faire une réelle étude de la dépendance de l'ouverture numérique avec les paramètres d'écriture. Les ouvertures numériques des guides fabriqués se situent dans la gamme 0.030-0.045, correspondant à des augmentations d'indice de 3.1×10^{-4} à 7.0×10^{-4} à 633 nm. Ces valeurs sont identiques lorsque l'injection est réalisée par différents objectifs de microscope (ON=0.25 ou 0.3 au laboratoire, ON=0.9 en Allemagne) et semblent donc refléter correctement les ouvertures numériques des guides. Ce sont des valeurs légèrement inférieures à celles évoquées dans la littérature pour la silice. Cependant, l'influence des paramètres expérimentaux sur la modification d'indice n'est pas mesurable. La littérature donne les résultats suivants : Δn augmente avec l'énergie et le nombre de passages [155, 189, 191] et diminue avec la vitesse de translation [95].

Analyse en champ proche : mode guidé

Une imagerie du mode de sortie sur une caméra CCD est réalisée grâce à un objectif de microscope $\times 40$, ON=0.65. Comme la frontale est très courte, la sortie du guide ne doit pas être enterrée de plus de 400 μm à l'intérieur de l'échantillon pour pouvoir réaliser l'imagerie.

La mesure présentée ici est réalisée pour le guide exhibant l'augmentation d'indice la plus élevée que nous ayons mesurée ($\Delta n = 7.0 \times 10^{-4}$). Ce guide a été inscrit par 4 passages à 50 $\mu\text{m/s}$, avec une énergie de 1.5 μJ . Son diamètre est mesuré à 6.2 μm . Un mode fondamental LP_{01} est obtenu (figure 7.31). L'ajustement gaussien donne une largeur totale à $1/e^2$ égale à 14 μm . L'extension radiale du mode guidé est donc supérieure au diamètre du guide, ce qui est un résultat classique d'optique guidée pour le mode fondamental. Afin de mieux caractériser ce guide, on calcule la fréquence normalisée V définie par :

$$V = \frac{\pi}{\lambda} \cdot \phi \cdot \text{ON} \quad (7.3)$$

avec ϕ le diamètre du guide et λ la longueur d'onde de la lumière injectée. C'est la valeur de V qui fixe les propriétés monomodes ou multimodes du guide. Pour $0 < V < 2.405$, le guide sera monomode LP_{01} ; pour $2.405 < V < 3.832$, le guide sera multimode puisqu'il acceptera le mode LP_{11} .

Avec les valeurs expérimentales pour ce guide, nous obtenons $V=1.38$, en accord avec le mode LP_{01} observé. De plus, une bonne approximation de la dimension du mode fondamental est donnée par l'expression suivante [192] :

$$\frac{w_0}{a} = 0.65 + \frac{1.619}{V^{3/2}} + \frac{2.879}{V^6} \quad (7.4)$$

où w_0 désigne le rayon du mode et a le rayon du guide. Nous obtenons ainsi un rapport égal à 2.1, soit un diamètre de mode théorique de 13 μm . La mesure expérimentale de 14 μm est donc en bon accord avec cette valeur.

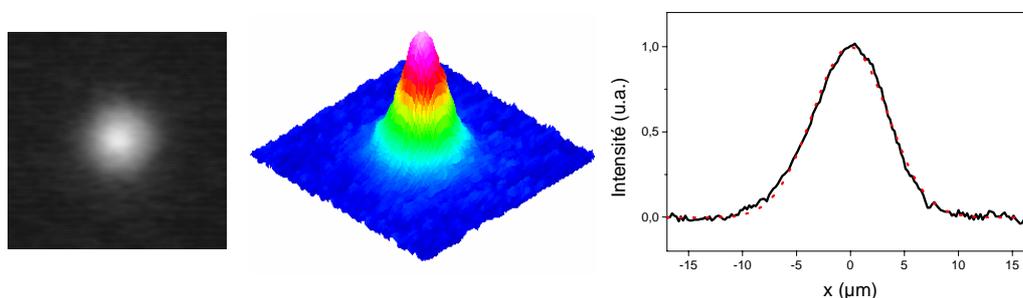


Figure 7.31 – Mode LP_{01} observé lors de l'imagerie du mode de sortie en champ proche. Le profil est gaussien de largeur totale 14 μm à $1/e^2$.

7.5 Guides multimodes

7.5.1 Guides multimodes circulaires

Tous les guides que nous avons inscrits précédemment sont monomodes, principalement à cause de leur faible diamètre. Pour fabriquer des guides multimodes, nous avons utilisé une lentille de grande focale ($f=76.2$ mm) de façon à obtenir un point focal limité par diffraction plus gros (6 μm de diamètre, pour une ouverture numérique d'inscription de 0.08). Pour une énergie de 1.5 μJ et une vitesse de translation de 10 $\mu\text{m/s}$, le guide multimode de la figure 7.32 a été obtenu. Ce mode s'étend sur un diamètre de 20 μm dans la direction horizontale, comportant les deux lobes caractéristiques d'un mode LP_{11} .

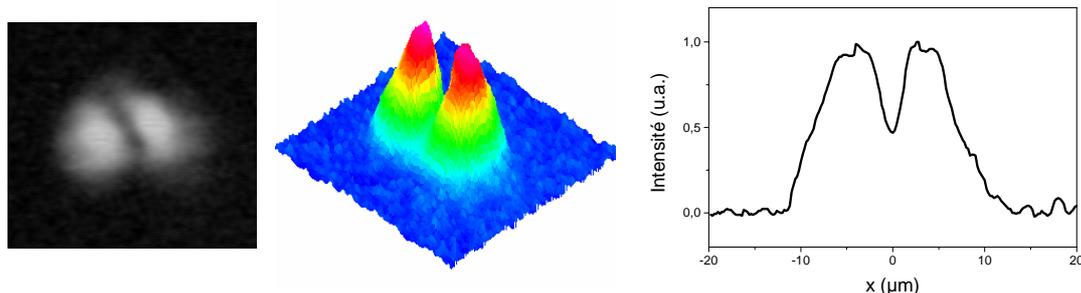


Figure 7.32 – Mode LP_{11} observé lors de l'imagerie du mode de sortie en champ proche. L'extension du mode est $20\ \mu\text{m}$. On observe bien les deux lobes caractéristiques de ce mode.

L'ouverture numérique mesurée est de 0.03. Cette valeur correspond à une augmentation d'indice de $\Delta n = 3.1 \times 10^{-4}$. Nous n'avons pas conduit d'analyses morphologiques sur ce type de guides, nous ne disposons donc pas d'une valeur précise de diamètre. Cependant, comme la fréquence normalisée pour ce mode LP_{11} doit être comprise entre 2.405 et 3.832, le diamètre correspondant est attendu entre 16 et $26\ \mu\text{m}$, correspondant cette fois à l'extension radiale mesurée du mode, comme attendu pour un fonctionnement multimode.

7.5.2 Guides multimodes avec mise en forme

Lors de l'inscription de guides, l'étude du plasma a révélé la présence d'effets d'incubation, l'étude de la morphologie et du diamètre des guides ont mis en évidence l'absence d'accumulation thermique. L'étude des propriétés de guidage permet de relier la taille du guide (précisément connue grâce à la correction active de front d'onde) et celle du mode.

En utilisant la mise en forme de tache focale, il semble donc possible de graver des guides avec une section contrôlée. Une section carrée ou annulaire pourrait par exemple ainsi être envisagée. De la même façon, un faisceau top-hat pourrait éventuellement permettre de contrôler l'amplitude du Δn induit, de même que son profil (saut ou gradient d'indice). Des tests préliminaires ont été réalisés, révélant les conditions de faisabilité d'une telle expérience. Tout d'abord, pour que la répartition de la lumière guidée corresponde à la section du guide, des guides hautement multimodes, donc larges ($\sim 50\ \mu\text{m}$) sont nécessaires. Sur de telles surfaces, l'énergie du laser d'inscription dont nous disposons n'est pas suffisante pour dépasser le seuil de

modification d'indice de la silice (quelques J/cm^2). Il faudrait donc adapter le système de mise en forme de faisceau sur une chaîne laser plus énergétique de cadence inférieure. La deuxième difficulté provient de la répartition d'intensité de part et d'autre du point focal. La figure 4.27 du chapitre 4 montre que, si la mise en forme est effectivement réalisée à l'endroit où le faisceau est le plus petit (donc là où la fluence est la plus élevée), il existe des points chauds dans les distributions d'intensité obtenues avant et après le point focal. Ceux-ci risquent donc également de provoquer une modification d'indice, modifiant du même coup le profil du guide inscrit. Pour éviter ceci, il faudrait limiter la longueur du guide à la longueur de Rayleigh de la mise en forme. Deux options sont alors envisageables : i) graver un guide très court dans un échantillon mince, soit environ 1 mm pour une tache focale de $50 \mu m$, ii) graver un guide très large ($500 \mu m$) pour repousser les points chauds en dehors de l'échantillon et garder un guide de longueur correcte (10 mm). La réalisation de guides à section contrôlée ne semble donc pas inaccessible, mais elle est soumise à certaines limitations importantes.

7.6 Conclusion

Nous avons étudié dans ce chapitre l'inscription de guides d'ondes en volume dans les verres par des impulsions femtosecondes. Dans ce récent domaine de recherche, deux techniques sont performantes aujourd'hui : i) L'inscription en configuration transverse à haute cadence avec une forte focalisation, qui conduit à des guides à section circulaire mais dont les possibilités tridimensionnelles sont limitées. ii) La technique avec sources amplifiées basse cadence, moins restrictive pour les composants 3D car elle autorise soit la configuration transverse qui permet d'obtenir des guides à section elliptique, soit la configuration longitudinale qui autorise l'inscription de guides à section circulaire. Se pose alors naturellement la question du contrôle des paramètres des guides d'ondes réalisables : profil d'indice, taille et forme du guide, etc. Dans l'étude réalisée ici, nous avons montré que le contrôle du point focal permet un meilleur contrôle de la section du guide en configuration longitudinale.

Grâce à la correction en temps réel des aberrations du faisceau, nous disposons d'un point focal de taille précisément contrôlée. Dans le régime de cadence utilisé (100 kHz) nous avons mis en évidence l'absence d'effets d'accumulation thermique dans la

silice pure. Avec un contrôle de la taille du point focal procuré par le dispositif de correction de front d'onde, nous avons alors réalisé une étude de l'influence des conditions expérimentales sur la morphologie et le diamètre des guides inscrits. En couplant les résultats avec des analyses du plasma créé lors de l'inscription des guides, les paramètres optimums pour la réalisation de structures guidantes ont été déterminés. Nous avons alors montré que le diamètre du guide peut alors être contrôlé par le diamètre du point focal du laser d'inscription, permettant la réalisation de guides de diamètre 2 μm . Le mode guidé et les propriétés monomodes ou multimodes des guides inscrits sont également contrôlables grâce à la maîtrise des dimensions du faisceau d'écriture.

Les perspectives de cette étude sont multiples. Ici, le dispositif de modulation de phase a été utilisé pour une correction active des aberrations du faisceau d'inscription. Pour un meilleur contrôle des propriétés des guides, et notamment une bonne homogénéité sur toute la longueur inscrite, il semble très intéressant de réaliser également une correction en temps réel des aberrations introduites lors de la focalisation dans l'échantillon de verre, notamment l'aberration sphérique. En outre, le contrôle encore plus précis du point focal dans le verre constituerait un outil utile pour faire progresser l'identification des mécanismes en jeu lors de la focalisation, et donc de pouvoir influencer sur la propagation non-linéaire des impulsions courtes dans les diélectriques. Par exemple, avec un faisceau top-hat, l'effet Kerr n'introduit théoriquement pas d'autofocalisation.

La mise en forme de tache focale permettrait quant à elle d'ouvrir de nouvelles possibilités pour la photoinscription de guides. Nous avons déjà évoqué des guides par exemple à section carré ou annulaire, on pourrait également réaliser des guides en cône dont le diamètre augmente ou diminue au fur et à mesure de la propagation ("tapers"), qui sont utilisés pour des applications télécom. De manière un peu différente, et sous réserve de pouvoir calculer les cartes de phase adéquates, ce système pourrait être utilisé avec profit pour réaliser de l'inscription simultanée multi-points. On peut imaginer un point focal qui se séparerait en trois points au cours du temps (film de modulation de phase), permettant ainsi de réaliser des composants 3D en une unique étape.