

Micro-usinage de surface

Nous avons vu au chapitre précédent que l'interaction laser-matière peut donner lieu à deux types de résultats en fonction de la fluence laser : modifications structurales si la fluence est faible, ablation de matière si la fluence est suffisamment élevée. Dans ce chapitre, on s'intéresse à l'ablation de matière en surface.

L'objet de ce chapitre est d'étudier dans quelle mesure le contrôle de la forme de la tache focale permet d'améliorer les conditions d'interaction laser-matière en contrôlant la taille et la forme de la zone ablatée, et notamment d'augmenter la qualité et l'efficacité de l'usinage. En effet, dans la course permanente à la miniaturisation et à l'augmentation de la précision des procédés, l'étude de la structuration directe du faisceau laser lui-même n'a pas encore été explorée. Grâce au dispositif de mise en forme de tache focale développé dans la première partie de ce travail, l'utilisateur dispose alors d'un vaste choix de formes de faisceau de dimensions micrométriques, permettant d'élargir la gamme d'applications des lasers à impulsions ultra-brèves pour l'interaction laser-matière. Après avoir identifié les paramètres clés pour les expériences, nous présentons les possibilités nouvelles procurées par le contrôle de la phase du faisceau. On s'intéressera tout d'abord à l'usinage femtoseconde à la limite de

diffraction, puis à l'amélioration de la qualité d'usinage grâce à un faisceau top-hat, et enfin au micro-usinage direct de motifs complexes.

6.1 Paramètres expérimentaux fondamentaux

On s'intéresse ici aux caractéristiques macroscopiques de l'ablation, c'est-à-dire l'obtention d'un usinage de grande qualité. La majorité des expériences d'ablation de surface présentées dans ce travail concerne les métaux. Bien que la réponse d'un matériau à l'excitation laser dépende étroitement de ses propriétés électroniques*, de grandes tendances de comportement valables pour tous les matériaux (diélectriques inclus) ont été dégagées depuis quelques années. Afin de déterminer les paramètres expérimentaux optimaux pour pouvoir réaliser les expériences dans les meilleures conditions, nous présentons ici quelques points clés issus de la littérature à ce sujet.

6.1.1 Durée d'impulsion

L'intérêt des impulsions ultra-courtes par rapport aux impulsions nanosecondes a déjà été mentionné au chapitre 5. Cependant, des différences sont observables dans la gamme subpicoseconde. Lenzner *et al.* [121] ont montré dans le cas des diélectriques que la qualité d'usinage pouvait être encore augmentée en diminuant la durée d'impulsion, avec une amélioration notable lorsque l'on passe de quelques centaines à quelques dizaines de femtosecondes. Un système délivrant de telles impulsions est cependant trop complexe et pas encore assez fiable pour envisager à l'heure actuelle un transfert vers l'industrie. Le laser dont nous disposons délivre des impulsions d'une durée de 130 fs, ce qui permet de réaliser un usinage de qualité déjà très acceptable.

6.1.2 Cadence

Pour éviter d'observer des effets d'accumulation thermique, la cadence des impulsions laser doit tenir compte du temps de refroidissement du matériau usiné, afin que chaque nouvelle impulsion arrive sur un matériau non préalablement chauffé. De

* d'où une différence de comportement pour un métal simple, un métal de transition ou un métal noble, et des résultats de micro-usinage différents.

manière générale, ceci impose de travailler à des cadences inférieures au GHz pour les métaux et au MHz pour les diélectriques. Pour des raisons de qualité de faisceau, une cadence de 100 kHz a été adoptée pour toutes les expériences présentées dans ce manuscrit.

6.1.3 Fluence

On peut distinguer deux régimes d'ablation, en fonction de la fluence incidente sur le matériau [122, 123]. Lorsque l'on considère le taux d'ablation, c'est-à-dire la profondeur ablatée par impulsion, la limite entre les deux régimes se situe aux environs de 1 J/cm² pour les métaux et 10 J/cm² pour les diélectriques, soit approximativement cinq fois le seuil d'ablation. Pour chaque régime, la profondeur L ablatée par impulsion obéit à une loi logarithmique en fonction de la fluence laser F (voir figure 6.1), de la forme suivante [124] :

$$L = d \ln \left(\frac{F}{F_d^{seuil}} \right) \quad (6.1)$$

d désigne la profondeur de pénétration, et F_d^{seuil} est la fluence correspondant au seuil d'ablation du matériau. Les valeurs de ces deux paramètres dépendent du régime considéré (basse ou haute fluence), d s'identifie à l'épaisseur de peau* en régime basse fluence et à la distance de diffusion thermique électronique** en régime haute fluence.

Concernant les mécanismes, Momma *et al.* [125] ont montré qu'en régime basse fluence, l'ablation femtoseconde se fait par la création de phases de vapeur et de plasma et l'absence de phase liquide. Sur les résultats d'usinage associés, aucune trace de matière fondue n'a été observée en régime basse fluence, alors qu'une fine couche de matériau fondu apparaît pour des fluences plus élevées [122]. La meilleure qualité d'usinage est donc obtenue pour une faible fluence, juste au dessus du seuil d'ablation du matériau. Pour nos expériences, on s'efforcera donc de rester dans le régime basse fluence pour les matériaux usinés.

* c'est-à-dire à la profondeur de pénétration du champ électromagnétique, soit typiquement 15 nm.

** soit environ 80 nm.

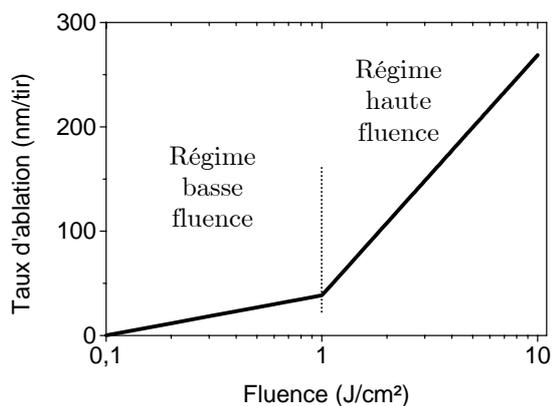


Figure 6.1 – Dépendance logarithmique du taux d'ablation (profondeur ablatée par impulsion) en fonction de la fluence laser : deux régimes sont mis en évidence.

6.1.4 Nombre d'impulsions

A la cadence de 100 kHz, bien que le nombre d'impulsions incidentes sur le matériau ne semblerait *a priori* pas devoir jouer de rôle autre que l'augmentation de la profondeur d'ablation, on observe pour les métaux une dépendance de la fluence seuil selon une puissance du nombre N d'impulsions laser [126] :

$$F_{seuil}(N) = F_{seuil}(1)N^{S-1} \quad (6.2)$$

où $F_{seuil}(1)$ est la fluence seuil pour une impulsion, et S décrit l'état de fatigue du matériau dû aux contraintes accumulées après irradiation répétée ($S \leq 1$). On peut donc parler d'un effet d'incubation à la fois mécanique et thermique à la surface du matériau, contribuant à abaisser le seuil de dommages pour les impulsions suivantes. Expérimentalement, la qualité d'usinage est bien meilleure lorsque le nombre d'impulsions reste raisonnablement faible, avec une limite supérieure de l'ordre de 10^5 .

6.1.5 Cas des diélectriques

Etant donné qu'une expérience d'ablation de surface d'un diélectrique (rubis) a également été réalisée, il semble opportun d'évoquer rapidement les paramètres supplémentaires pour ce type de travail.

Commençons par l'influence du nombre d'impulsions. Stoian *et al.* [116, 127] distinguent deux régimes d'ablation : la phase douce ("gentle phase") suivie de la phase forte ("strong phase"). La première phase consiste en la formation de défauts dans le gap, qui agissent comme une réserve d'électrons plus facilement excitable lors des impulsions suivantes (phénomène d'incubation). Cette phase, identifiée comme correspondant aux premières 25-30 impulsions, mène à une très faible efficacité d'ablation par impulsion ($\sim 30 \text{ nm}^*$) résultant d'un phénomène de répulsion électrostatique des ions entre eux lorsque les électrons énergétiques ont été éjectés de la surface. Ce mécanisme est connu sous le nom d'explosion coulombienne**, le résultat d'usinage de surface est alors extrêmement propre, pouvant laisser des surfaces plus uniformes que celles initiales. Au-delà d'une trentaine d'impulsions, on entre dans un régime d'ablation plus violent et plus efficace ("strong phase"), la profondeur ablatée par impulsion est dix fois supérieure. Ce mécanisme fait intervenir des changements de phase, l'ablation se produisant par l'expansion thermique du plasma. Une décroissance exponentielle du seuil de dommages F_{seuil} en fonction du nombre N d'impulsions [115, 128] a également été mise en évidence, le seuil étant diminué à cause d'une accumulation de défauts dans le gap :

$$F_{seuil}(N) = F_{seuil}(\infty) + [F_{seuil}(1) - F_{seuil}(\infty)] e^{-k(N-1)} \quad (6.3)$$

$F_{seuil}(\infty)$ est l'asymptote de la courbe pour un nombre d'impulsions élevé, $F_{seuil}(1)$ est la fluence seuil en mono-coup, et k est un paramètre expérimental caractérisant l'influence plus ou moins forte de l'incubation. Cette dépendance exponentielle se distingue de la loi en puissance de N valable pour les métaux.

Enfin, contrairement aux expériences qui seront présentées au chapitre 7, il s'agit ici d'usinage *de surface*. Alors que dans la masse du matériau l'interaction a lieu dans un milieu présentant une symétrie isotropique, il faut tenir compte ici du fait que la

* ce qui correspond aux premières couches atomiques.

** ce mécanisme est valable uniquement pour les diélectriques, pas pour les métaux ni les semiconducteurs.

surface d'un matériau est par nature un défaut (états de surface). En particulier, dans les oxydes isolants, la région de la surface est en général riche en défauts ponctuels (lacunes d'oxygène notamment) [129]. Des impuretés ou des défauts peuvent avoir une influence non négligeable sur l'absorption, et ainsi contribuer à diminuer le seuil de dommages.

6.1.6 Conclusion et implications pour nos expériences

Nous avons vu qu'une des clés de l'usinage femtoseconde réside dans l'usinage à faible énergie et cadence modérée. Le laser disponible pour ces expériences a été présenté en détail au chapitre 1, il délivre des impulsions de quelques microjoules (suffisant pour dépasser le seuil de n'importe quel matériau à condition de focaliser le faisceau sur une surface assez petite) à une cadence de 100 kHz (soit une période inférieure au temps d'incubation des métaux et des diélectriques, mais pas trop faible pour pouvoir bénéficier d'une bonne vitesse de travail). Pour chaque matériau, un apprentissage est nécessaire pour déterminer la valeur optimale de fluence laser qui permet de maximiser la quantité de matière ablatée par impulsion tout en gardant une bonne qualité d'usinage. Ce compromis s'obtient généralement avec une fluence égale à quelques fois le seuil de dommages, qui se situe un peu avant la transition avec le régime haute fluence. Des tests systématiques sur divers matériaux ont donc été réalisés (cuivre, aluminium, nickel, inox, polycarbonate, alumine, rubis, saphir...) afin d'acquérir une expérience sur la réponse des matériaux à cette cadence. Ceci a permis de déterminer les réglages adéquats d'énergie et du nombre d'impulsions, et également de choisir les matériaux permettant d'obtenir les meilleurs résultats d'usinage, afin de démontrer clairement l'intérêt de la correction des aberrations du faisceau et de la mise en forme de tache focale.

Les matériaux retenus sont l'acier inoxydable pour les métaux (inox 316 : Fe/Cr18/Ni10/Mo3) et le rubis pour les diélectriques. Le nombre d'impulsions met en évidence un phénomène d'incubation par la création de contraintes dans les métaux et de défauts dans les diélectriques, contribuant à diminuer artificiellement le seuil de dommages. Pour les expériences présentées ci-dessous, la durée d'irradiation typique est de une seconde soit 10^5 impulsions, afin d'atteindre un régime où la profondeur d'ablation devient linéaire avec le nombre d'impulsions.

6.2 Dispositif expérimental

6.2.1 Configuration d'usinage au point focal ou au point image

Sachant que l'ablation de matière a lieu uniquement dans la zone où l'intensité est suffisante pour former un plasma, le contrôle de la forme de cette zone est primordial. Afin de bénéficier d'une densité d'énergie maximale, la configuration évidente consiste à placer le matériau à usiner dans le plan focal de la lentille (figure 6.2.a). Cependant, la taille et la forme du point focal sont affectées par les aberrations du faisceau, diminuant ainsi la qualité d'usinage. La solution couramment adoptée consiste alors à placer un diaphragme ou un masque sur le trajet du faisceau, et à réaliser l'usinage dans le plan image du diaphragme (figure 6.2.b). La fluence n'est alors pas maximale dans ce plan, on ne bénéficie pas des profondeurs d'ablation optimales. Par contre, on contrôle dans une certaine mesure la forme du faisceau dans le plan image, de façon à se rapprocher d'un faisceau "top-hat".

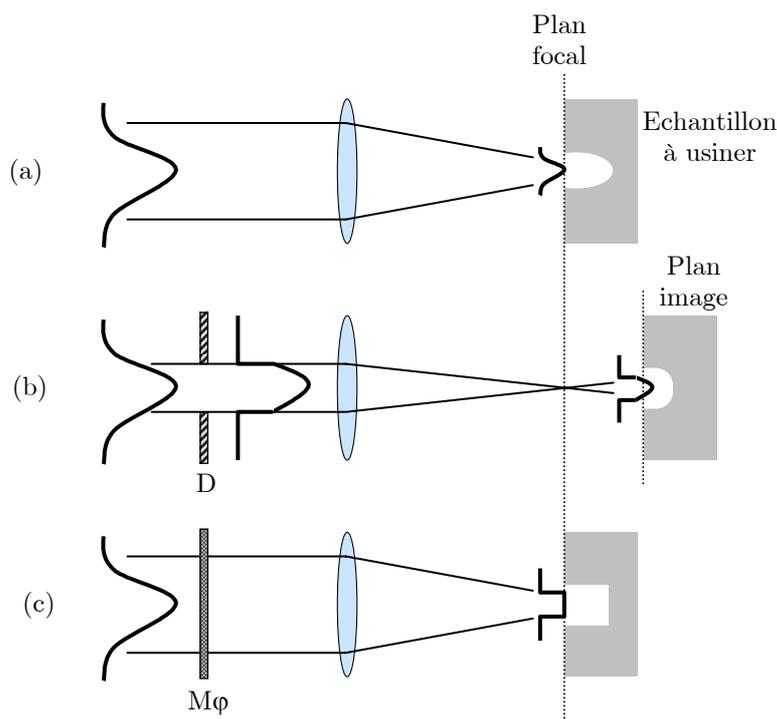


Figure 6.2 – Différentes configurations optiques pour l'usinage de surface : (a) usinage au plan focal, (b) usinage dans le plan image du diaphragme D, (c) usinage au plan focal avec mise en forme du point focal grâce au modulateur de phase $M\phi$.

L'utilisation d'un modulateur de phase permet de s'affranchir des inconvénients de ces deux techniques, en offrant la possibilité d'usiner au point focal (meilleure efficacité) avec un faisceau mis en forme (figure 6.2.c). Dans toute la suite, c'est la configuration (c) qui sera systématiquement utilisée, que ce soit pour l'usinage à la limite de diffraction ou l'usinage avec mise en forme de tache focale. Dans les deux cas, la taille du faisceau laser sur l'échantillon est précisément contrôlée.

6.2.2 Montage expérimental mis en œuvre

Le dispositif expérimental, basé sur le même schéma que le système développé dans la partie I, est détaillé sur la figure 6.3. Le système laser délivre des impulsions de 4 μJ et 130 fs à la cadence de 100 kHz, avec une longueur d'onde de 800 nm. La modulation de phase est appliquée par la valve optique, le système d'optique adaptative faisant intervenir le Shack-Hartmann et un ordinateur est décrit en détail au chapitre 4. Le résultat de mise en forme est obtenu aux environs du point focal S_1 d'un objectif de microscope. La transmission cumulée de tout le système optique, depuis la source jusqu'à l'échantillon, est d'environ 50%. Des impulsions de 2 μJ sont donc disponibles dans le plan focal. Afin de pouvoir placer un échantillon dans le plan focal et de continuer à bénéficier d'un contrôle en temps réel de la forme de la tache focale, un deuxième point focal S_2 identique au premier est créé avec un autre objectif de microscope, et le résultat est imagé sur une caméra CCD, puis analysé grâce à un logiciel adapté. L'échantillon est monté sur un ensemble de trois platines de translation motorisées pilotées sous Labview (moteurs pas-à-pas, précision 0.5 μm) et un système manuel de rotation trois axes. La précision de reproductibilité du positionnement du système se situe autour de 2 μm .

Nous utilisons un dispositif de visualisation de l'échantillon permettant également le réglage précis de son positionnement. Un laser HeNe superposé au faisceau femtoseconde vient éclairer l'échantillon. Une image de sa surface est réalisée sur une caméra CCD grâce à la lumière rétro-diffusée, par l'intermédiaire d'un système afocal constitué de l'objectif de focalisation lui-même et d'une lentille supplémentaire. On visualise alors les effets de tavelure (Speckle) dus à la rugosité de l'échantillon. Pour placer l'échantillon précisément au point focal, il suffit de le translater parallèlement au faisceau jusqu'à maximiser la taille des grains de tavelure. La précision doit être de l'ordre de la distance de Rayleigh de la tâche focale, soit quelques microns pour les

objectifs de microscope utilisés. Comme les longueurs d'onde du laser HeNe et du laser femtoseconde sont différentes, l'aberration chromatique axiale tend à faire focaliser le faisceau HeNe avant le faisceau à 800 nm. Cependant, comme les diamètres des deux faisceaux sont différents, l'aberration sphérique subie par le faisceau femtoseconde est plus importante et la zone de Rayleigh plus longue. Le cumul de ces effets ne conduit pas à une différence notable de point de focalisation, un réglage effectué selon cette procédure est très bon avec les focales utilisées*. Ce système procure en outre une bonne imagerie de la surface de l'échantillon lorsque les effets de tavelure sont moyennés par l'ajout d'un dépoli tournant permettant de casser la cohérence spatiale. En sortie de la chaîne laser, sont placés à demeure une caméra CCD permettant de contrôler la forme du faisceau incident et un autocorrélateur pour mesurer la durée d'impulsion.

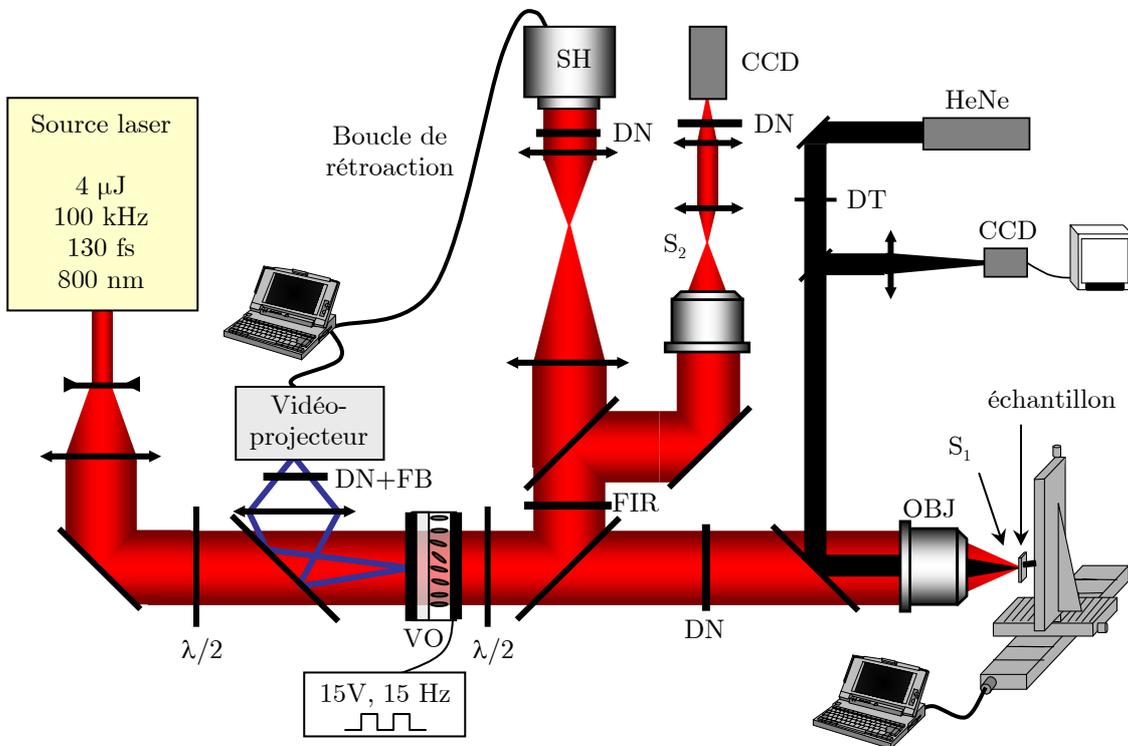


Figure 6.3 – Schéma du dispositif expérimental. Source laser : 4 μJ , 100 kHz, 130 fs, 800 nm. $\lambda/2$: lame demi-onde ; la valve optique (VO) est adressée par le faisceau d'un vidéoprojecteur devant lequel est placé un filtre bleu (FB) pour centrer le spectre d'émission autour de 450 nm ; des densités neutres (DN) sont placées devant le vidéoprojecteur, le Shack-Hartmann, la caméra CCD et avant l'objectif OBJ pour ajuster les intensités des faisceaux. Un filtre infrarouge (FIR) est placé après la lame de prélèvement. SH : Shack-Hartmann (senseur de front d'onde). L'échantillon, monté sur des platines de translation, est placé au point focal S_1 . Un autre point focal identique est créé en S_2 , puis imagé sur une caméra CCD. Un laser hélium-néon et un dépoli tournant (DT) procurent une imagerie en temps réel de l'échantillon lors de l'usinage, sur une caméra CCD.

* Ceci a été vérifié expérimentalement en réalisant à chaque fois plusieurs usinages autour de la position déterminée par cette procédure.

6.3 Micro-usinage femtoseconde à la limite de diffraction

6.3.1 Micro-usinage de trous limités par diffraction

Nous avons vu au chapitre 3 que la correction active de front d'onde permet d'obtenir un point focal de taille limitée par diffraction. Afin de démontrer l'intérêt de ce résultat pour les applications, des micro-usinages de surface ont été réalisés sur deux types de matériau : un métal (inox) et un diélectrique (rubis). L'inox présente un seuil d'ablation assez bas (400 mJ/cm^2), tandis que le rubis est un matériau extrêmement dur (seuil $> 10 \text{ J/cm}^2$). Ces valeurs sont calculées par extrapolation à partir de mesures de profondeurs ablatées [60]. Pour chaque matériau, on compare les résultats d'usinage avec et sans correction de front d'onde, tout les autres paramètres expérimentaux étant égaux par ailleurs. En fonctionnement quotidien, le front d'onde corrigé présente des aberrations résiduelles d'amplitude pic-vallée $PV=\lambda/10$ et d'écart-type $\sigma=\lambda/50$, correspondant à un rapport de Strehl de 98.5%. Chaque échantillon est irradié par $5 \cdot 10^4$ impulsions de 130 fs à la cadence de 100 kHz. L'énergie par impulsion est ajustée grâce à des densités neutres de façon à atteindre approximativement le double du seuil d'ablation (20 nJ pour l'inox et 650 nJ pour le rubis). La transmission du dispositif expérimental étant en outre affectée par le petit diamètre d'ouverture de l'objectif de microscope utilisé ($\times 20$, $NA=0.3$, focale $f=10 \text{ mm}$, frontale=17 mm), l'énergie maximale délivrée par la chaîne laser femtoseconde est requise pour l'usinage du rubis.

L'analyse des résultats est effectuée au microscope électronique à balayage (MEB) à émission de champ*, permettant d'obtenir une imagerie de haute résolution. Pour les diélectriques, non conducteurs de courant, on observe un phénomène de charge, c'est-à-dire d'accumulation d'électrons à l'endroit bombardé par le canon à électrons du MEB. Le détecteur d'électrons secondaires y est alors beaucoup plus sensible, et la zone en question apparaît en blanc, empêchant la distinction de détails. Pour éviter cela, on réalise au préalable une métallisation de la surface, par dépôt d'une fine couche de palladium ($\sim 10 \text{ nm}$) par pulvérisation cathodique. Les résultats d'usinage sont reportés sur la figure 6.4, pour l'inox (a,b) et pour le rubis (c,d).

Le trou usiné sans correction de front d'onde dans l'inox (figure 6.4.a) présente une forme distordue elliptique ($1.7 \mu\text{m} \times 1.2 \mu\text{m}$), tandis que le trou usiné avec un faisceau corrigé des aberrations est bien circulaire, avec un diamètre de $1.8 \mu\text{m}$ (figure

* JEOL JSM-6500F Field Emission Scanning Electron Microscope.

6.4.b). Pour le rubis, l'effet de la correction de phase est encore plus flagrant : la zone ablatée sans correction de front d'onde est extrêmement distordue (figure 6.4.c) alors que l'usinage avec un faisceau corrigé permet d'obtenir un trou rond et très propre, de diamètre 1.7 μm (figure 6.4.d).

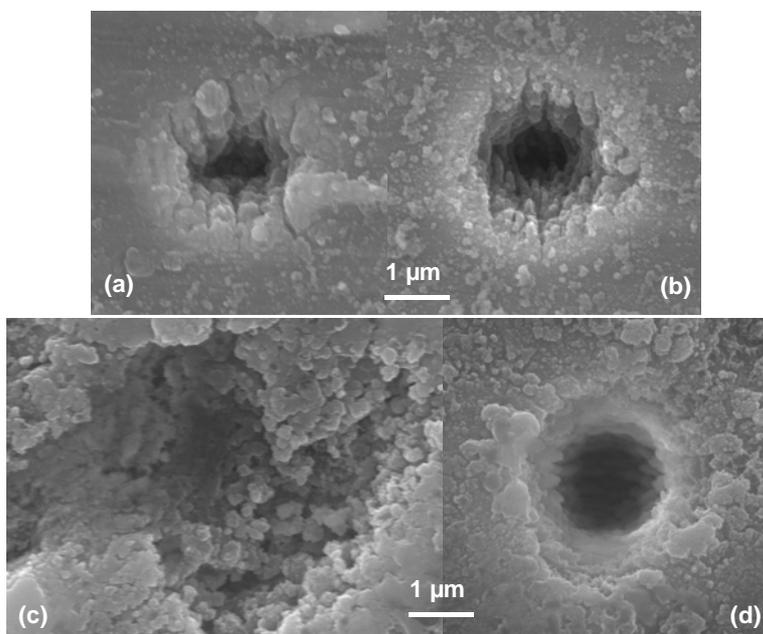


Figure 6.4 – Résultats de micro-usinage (images MEB) sur l'inox (a,b) et sur le rubis (c,d). Conditions expérimentales : 5.10^4 impulsions, 130 fs, 100 kHz, 20 nJ pour l'inox et 650 nJ pour le rubis.

(a),(c) : Sans correction de front d'onde ($PV=\lambda/2$, $\sigma=\lambda/12$), on obtient un trou distordu de $1.7 \mu\text{m} \times 1.2 \mu\text{m}$ pour l'inox (a) et une zone complètement difforme pour le rubis (c).

(b),(d) : Avec un front d'onde corrigé ($PV=\lambda/10$, $\sigma=\lambda/50$), on obtient un trou bien circulaire de diamètre $1.8 \mu\text{m}$ pour l'inox (b) et $1.7 \mu\text{m}$ pour le rubis (d).

On peut remarquer deux comportements très différents pour l'inox et le rubis lors de l'usinage avec un faisceau non corrigé. Bien que l'hypothèse de mécanismes différents ne puisse être écartée d'emblée, une explication plausible est la suivante. Sur la figure 6.5, on a représenté les profils d'intensité des faisceaux distordu et corrigé. Suivant la position du seuil d'ablation (I_1^{seuil} ou I_2^{seuil}) par rapport à la fluence laser incidente sur l'échantillon, le diamètre du trou correspondant varie peu pour le faisceau corrigé ($r_1 \approx r_2$), tandis que le trou usiné avec le faisceau distordu peut présenter des différences notables pour une faible variation de I^{seuil} ($r_1 \neq r_2$)*. Etant donné la forte

* Le cas de l'inox correspond à I_1^{seuil} , celui du rubis à I_2^{seuil} .

incertitude sur les valeurs exactes des seuils d'ablation (surtout pour le rubis), ceci explique le fait que l'on puisse obtenir une zone distordue plus grande ou plus petite que la taille du faisceau limité par diffraction. Ainsi, la correction de front d'onde apporte à la fois un contrôle de la forme mais aussi des dimensions du trou, qui deviennent alors prédictibles. En outre, un autre avantage est que la correction de front d'onde permet d'augmenter la puissance crête du faisceau, donnant accès à l'usinage de matériaux à haut seuil d'ablation avec une source à faible énergie.

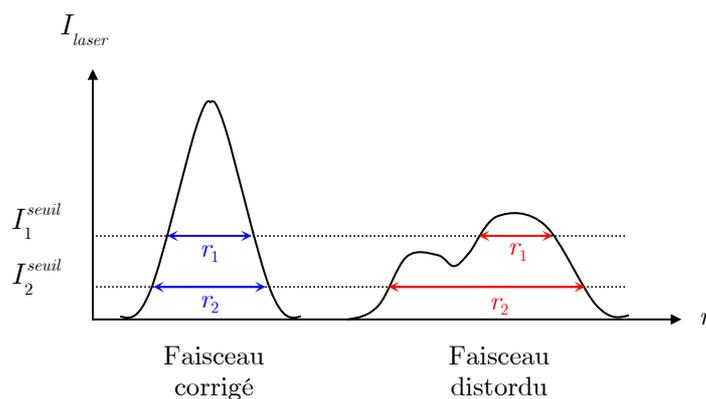


Figure 6.5 – Illustration de l'influence de la position de I_{seuil} sur la forme et la taille du trou usiné.

Pour les usinages réalisés avec correction de front d'onde, on peut souligner le bon accord entre les diamètres des trous (1.7 et 1.8 μm) et le diamètre du faisceau (1.7 μm , mesuré au paragraphe 3.4). Ces dimensions correspondent au calcul théorique de la taille de la tache de diffraction, donné par $1.22\lambda/2ON=1.63 \mu\text{m}$. Quel que soit le matériau, la correction de front d'onde procure la possibilité nouvelle de réaliser des micro-structures limitées par diffraction dans le plan focal, avec une fluence supérieure au seuil.

Ce qui nous intéresse ici n'est pas de réaliser des trous les plus petits possibles, mais de contrôler la taille du trou par l'intermédiaire de la taille du faisceau, en se plaçant au seuil d'ablation. En effet, pour diminuer la taille du trou, il suffit d'augmenter l'ouverture numérique de l'objectif de focalisation utilisé, de façon à obtenir un point focal plus petit. Il est également possible de réaliser des trous de taille inférieure à celle du faisceau, simplement en ajustant l'intensité du faisceau par rapport au seuil du matériau pour faire diminuer r (cf. figure 6.5). En contrepartie, les fluences requises sont tellement faibles que l'ablation est réalisée uniquement par le sommet de la gaussienne, les pieds de cette gaussienne provoquent une fusion du matériau, laissant une zone de bavures autour du trou après resolidification [130]. Ce type de technique,

permettant une structuration sub-micronique, a déjà été développée pour les métaux [130, 131] ou les verres [112], éventuellement couplée avec une attaque chimique [132]. Les profondeurs atteignables sont très limitées (10-100 nm) à cause d'une part des énergies très faibles mises en jeu, et d'autre part des très courtes focales des objectifs de microscope utilisés (typiquement $ON > 0.8$, $f \sim 1$ mm). Dans nos expériences, le faisceau femtoseconde est moins fortement focalisé ($ON = 0.3$), impliquant évidemment un point focal limité par diffraction plus gros, mais aussi une zone de Rayleigh bien supérieure autorisant une ablation plus profonde ($\sim 2 \mu\text{m}$). De plus, la distance de travail offerte (17 mm) est compatible avec des applications d'usinage, et pas uniquement d'ablation superficielle ou de structuration de surface. Ceci est illustré au paragraphe suivant par l'usinage d'une forme carrée dans un échantillon d'inox.

6.3.2 Utilisation : usinage d'un carré

Grâce au contrôle précis de point focal d'une telle chaîne laser amplifiée haute cadence, il est possible de réaliser un usinage profond et de qualité sur des dimensions réduites. La figure 6.6 présente une structure carrée de $15 \mu\text{m} \times 15 \mu\text{m}$, avec une profondeur approximative de $10 \mu\text{m}$. Cet usinage est réalisé par 3000 passages du faisceau avec un enfoncement de $2 \mu\text{m}$ tous les 100 passages. La vitesse de translation est de $100 \mu\text{m/s}$ et l'énergie par impulsion incidente sur l'échantillon est de 140 nJ . La légère distorsion des contours provient des platines de translation pas-à-pas, dont la vitesse est difficile à établir sur de si courtes distances : l'accélération consécutive à la mise en mouvement des platines provoque une déviation de la trajectoire. Une augmentation supplémentaire de la qualité d'usinage est donc possible après optimisation des conditions expérimentales. Cependant, on observe déjà des bords d'usinage très francs avec des pentes marquées, et une bonne régularité de surface. La photographie montrant l'agrandissement d'un angle met en évidence la qualité d'usinage atteignable grâce à un point focal limité par diffraction. Malgré un grand nombre d'impulsions, on ne distingue aucun redépôt de matière ni de traces de matière fondue, et l'angle droit est bien défini. Enfin, rappelons que le système de correction de front d'onde est ici installé sur une chaîne femtoseconde haute cadence (100 kHz), offrant l'avantage de pouvoir réduire considérablement le temps de process par rapport aux taux de répétition classiques situés dans la gamme 1-5 kHz [122, 133-135]. Le dispositif expérimental complet a fait l'objet d'un dépôt de brevet [52].

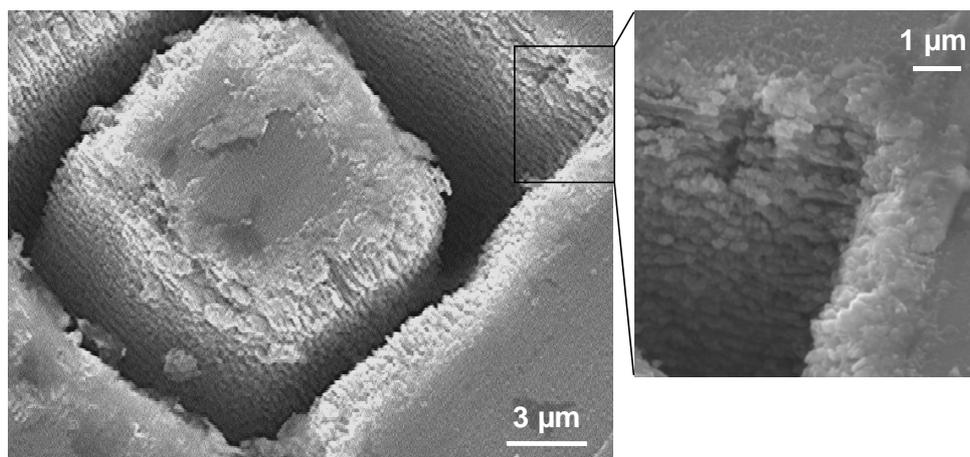


Figure 6.6 – Usinage d'un carré de $15 \times 15 \mu\text{m}^2$ dans l'inox par déplacement de l'échantillon, avec un point focal corrigé des aberrations (limite de diffraction). Conditions expérimentales : 130 fs, 140 nJ/impulsion, 100 kHz, vitesse de translation $100 \mu\text{m/s}$. Trente étapes sont effectuées, chacune consistant en 100 passages suivi d'un enfoncement de $2 \mu\text{m}$. L'agrandissement montre la qualité d'usinage des bords.

En résumé, la correction active de front d'onde permet l'usinage à la limite de diffraction dans le plan focal, qui s'avère d'une grande qualité, indépendamment du matériau. Des dimensions réduites sont atteignables sans devoir recourir à des énergies inférieures au seuil, on peut donc usiner profondément, comme illustré par l'usinage d'un motif carré de $15 \mu\text{m} \times 15 \mu\text{m}$ par translation de l'échantillon.

6.4 Micro-usinage avec un faisceau top-hat

Dans ce paragraphe, on s'intéresse à l'influence de la mise en forme de tache focale sur la qualité d'usinage, en démontrant l'intérêt d'un faisceau top-hat, et non plus seulement une correction de front d'onde. Pour cela, on utilise un objectif de microscope $\times 8$ ($\text{ON}=0.25$, $f'=25 \text{ mm}$, distance de travail 7 mm) conduisant à un point focal limité par diffraction* de largeur à mi-hauteur de $2 \mu\text{m}$ (FWHM). Le point focal top-hat obtenu grâce à la modulation de phase a été présenté sur la figure 4.22 du chapitre 4, son diamètre est $17 \mu\text{m}$ (FWHM).

* Bien que le point focal limité par diffraction soit rigoureusement une tâche d'Airy, on fera dans la suite l'approximation d'une répartition gaussienne.

6.4.1 Usinage ponctuel

La figure 6.7 compare les images MEB de trous usinés avec le faisceau limité par diffraction (figure 6.7.a) et le faisceau top-hat (figure 6.7.b), les énergies étant ajustées respectivement à $0.65 \mu\text{J}$ et $1.5 \mu\text{J}$. La différence de qualité d'usinage est notable : les pentes du trou sont plus raides pour le trou usiné avec le faisceau top-hat, engendrant un trou cylindrique plutôt que conique. Le lien direct entre le profil du faisceau et la forme du trou ainsi que la raideur des bords est ici clairement mis en évidence. La mise en forme de faisceau permet donc d'augmenter significativement la qualité de l'usinage. Des structures à bords nets présentent en outre l'avantage de pouvoir définir précisément une taille de trou. Le diamètre du trou usiné avec le faisceau top-hat est alors de $17 \mu\text{m}$ bord à bord, en excellent accord avec le diamètre du faisceau. A l'inverse, la délimitation du trou usiné avec le faisceau limité par diffraction n'est pas franche, avec un diamètre assez flou aux alentours de $8\text{-}10 \mu\text{m}$. Cette valeur est en désaccord avec celle théoriquement attendue ($2 \mu\text{m}$). En effet, un faisceau gaussien ne procure pas de pentes raides, l'usinage est également effectué par les pieds de la gaussienne. Remarquons qu'au paragraphe précédent, la correspondance entre taille du faisceau et diamètre du trou était excellente car la fluence était ajustée au double du seuil. Lorsque l'on augmente la fluence pour augmenter la profondeur d'usinage, le diamètre du trou est alors dépendant de l'intensité laser* (figure 6.8). A l'opposé, le diamètre du trou reste inchangé pour un faisceau top-hat, quelle que soit la fluence. Ceci se vérifie expérimentalement en comparant cet usinage à fluence maximale (0.66 J/cm^2) avec un marquage basse fluence (200 mJ/cm^2) qui sera présenté plus loin (cf. figure 6.10). Ainsi, la mise en forme top-hat du faisceau (bords droits) permet de rendre indépendants la fluence et la largeur du trou usiné, l'ajustement de la fluence devenant un moyen très simple de contrôler la profondeur d'usinage.

* De plus, il est assez difficile de définir une fluence, puisque la surface irradiée n'est pas précisément définie. En prenant le diamètre du faisceau à mi-hauteur, on obtient 20 J/cm^2 pour le point limité par diffraction et 0.66 J/cm^2 pour le faisceau top-hat. Ce calcul souligne l'intérêt de la mise en forme car l'usinage est de meilleure qualité avec une fluence inférieure.

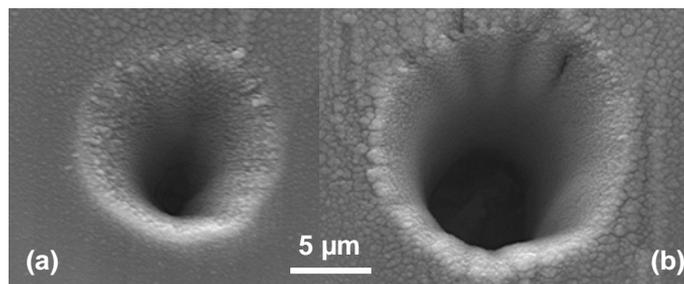


Figure 6.7 – Comparaison des résultats d’usinage dans l’in-ox (images MEB) avec un faisceau limité par diffraction (a) et un faisceau top-hat (b).

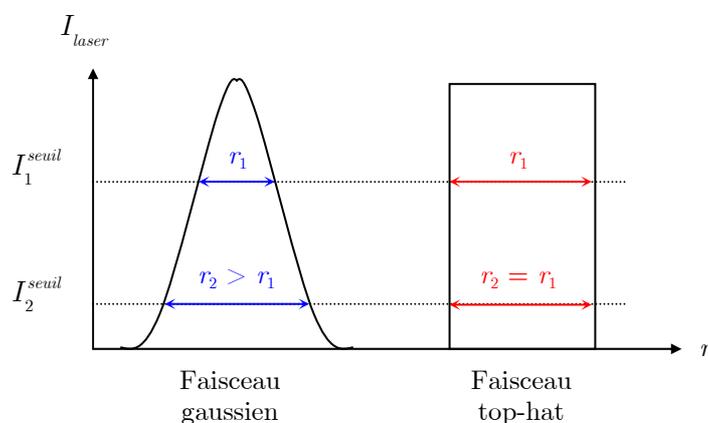


Figure 6.8 – Illustration de l’influence de la forme du faisceau sur le diamètre du trou usiné, en fonction de I_{seuil} .

6.4.2 Usinage de lignes

Afin de compléter cette étude de l’intérêt du contrôle de la forme du point focal pour l’amélioration de la qualité d’usinage, des expériences d’usinage de lignes ont également été réalisées. Ceci correspond à bon nombre de réalisations mécaniques demandées à la plateforme femtoseconde du Pôle Optique Rhône Alpes (PORA). Par translation de l’échantillon perpendiculairement au faisceau, deux sillons sont usinés sur de l’acier inoxydable, l’un avec un point focal limité par diffraction, l’autre avec un faisceau top-hat. Les conditions expérimentales sont les mêmes dans les deux cas : 10 passages successifs à la vitesse de $100 \mu\text{m/s}$ sont réalisés, avec des impulsions d’énergie

$1.5 \mu\text{J}^*$, de durée 130 fs, à la cadence de 100 kHz. Les résultats sont regroupés sur la figure 6.9 (images MEB). Le sillon (c) est usiné avec un faisceau gaussien limité par diffraction, le sillon (d) avec un faisceau top-hat. Les trous correspondants sont représentés respectivement sur les photographies (a) et (b).

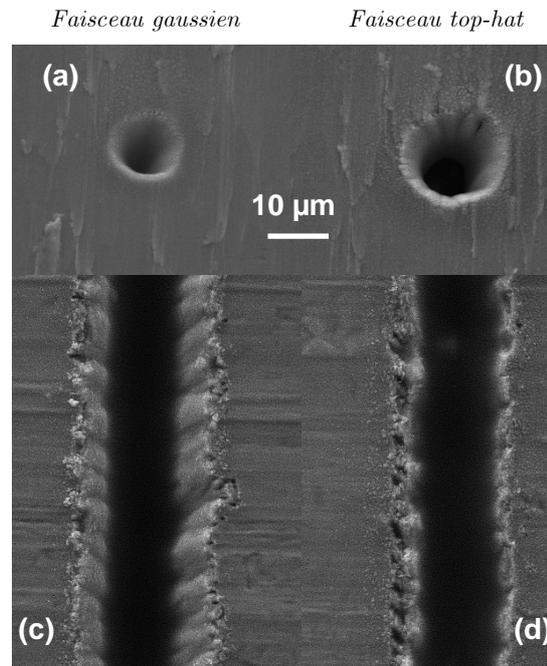


Figure 6.9 – Usinage de sillons dans l’acier inoxydable (c,d) avec respectivement un faisceau gaussien (a) et un faisceau top-hat (b). Paramètres d’usinage : 130 fs, $1.5 \mu\text{J}$ /impulsion, 10 passages à $100 \mu\text{m/s}$.

Le sillon usiné avec un faisceau gaussien (c) présente une largeur comprise entre $13 \mu\text{m}$ et $22 \mu\text{m}$, supérieure à la fois au diamètre du trou (a) correspondant ($\sim 10 \mu\text{m}$) et au diamètre théorique du point focal limité par diffraction ($2 \mu\text{m}$). Les trous des figures 6.7.a et 6.9.a étant usinés avec des énergies différentes, on retrouve ici le fait que le diamètre du trou dépend de la fluence incidente pour un faisceau gaussien. De plus, le nombre de passages (donc le nombre d’impulsions) augmente la largeur du sillon, qui devient alors difficilement prédictible. Concernant la qualité d’usinage des sillons, les bords sont plus francs et plus marqués avec un faisceau top-hat. Ceci permet en outre

* Pour ces applications d’usinage, nous avons utilisé le maximum d’énergie disponible avec cette source laser femtoseconde.

de définir précisément la largeur du sillon ($17\ \mu\text{m}$) illustrant à nouveau la bonne correspondance entre largeur du sillon et taille de faisceau.

On peut objecter que le bord des sillons n'est pas très rectiligne, il présente des oscillations. Ce défaut, observable sur les deux sillons, ne provient pas des manipulations de phase effectuées sur le faisceau, mais des platines de translation. D'une part le déplacement n'est pas linéaire à cause du fonctionnement pas-à-pas des moteurs, et d'autre part la précision n'est pas suffisante pour assurer le passage exactement au même endroit lors des 10 passages effectués (vibrations mécaniques). Cependant, ces expériences suffisent à mettre en valeur les avantages offerts par un faisceau top-hat : le diamètre du trou (ou du sillon) est directement corrélé au diamètre du faisceau et ne dépend ni de la fluence, ni du nombre d'impulsions, permettant ainsi un usinage encore plus contrôlable en termes de qualité et de précision d'usinage.

La modulation de la phase spatiale n'est pas la seule technique existante pour obtenir un faisceau top-hat. On peut par exemple mettre en place un filtrage d'amplitude pour sélectionner uniquement la partie centrale du faisceau gaussien initial (*cf.* figure 6.2), ou encore utiliser une technique de projection de masque [122]. Les inconvénients sont cependant multiples :

- i) Nécessité d'une grande énergie par impulsion car les pertes sont alors élevées. La tendance actuelle consistant à augmenter les taux de répétition pour gagner du temps, voire même à usiner directement avec des oscillateurs femtosecondes, impose de se contenter d'une énergie par impulsion faible. Il ne faut donc pas la gâcher.
- ii) L'usinage se fait alors dans le plan image plutôt qu'au point focal : les fluences sont plus faibles et les motifs plus gros. On doit alors se contenter de taux d'ablation non optimums, et ceci exclut d'autre part l'usinage de matériaux présentant des seuils d'ablation particulièrement élevés.
- iii) Nécessité d'une bonne uniformité du faisceau, ce qui est difficile à atteindre avec des chaînes laser à haute énergie (points chauds...)

Mais l'inconvénient majeur réside dans le fait qu'un filtrage d'amplitude n'est pas un système actif : un masque doit être réalisé pour chaque motif, et le changement de masque n'est pas immédiat. Avec le système adaptatif qui a été développé, une très large gamme de motifs complexes est accessible (*cf.* Partie I) avec un unique composant bon marché, à la seule condition de pouvoir calculer la modulation de phase adéquate.

Le passage d'un motif à l'autre se fait alors en temps réel et quasi-instantanément, par simple manipulation informatique. Le paragraphe suivant présente la démonstration de marquage et d'usinage avec d'autres formes de faisceau, présentant également un profil top-hat pour assurer une bonne qualité d'usinage.

6.5 Micro-usinage direct de motifs complexes

Ce paragraphe présente quelques résultats d'usinage avec des formes de faisceau variées, grâce à la versatilité du dispositif de mise en forme. Suivant la fluence laser incidente sur l'échantillon, deux types d'applications distinctes sont accessibles : le marquage et la micro-structuration de surface (usinage plus profond).

6.5.1 Marquage

Lorsque la densité d'énergie du faisceau femtoseconde est juste égale au seuil de dommages du matériau, le résultat obtenu est du marquage de surface. Pour ce genre d'expériences, un soin particulier doit donc être consacré au réglage de la fluence, de manière à atteindre le seuil empirique de marquage pour chaque forme de faisceau. Pour les quatre motifs présentés ci-dessous, l'énergie par impulsion est ajustée entre 0.48 et 0.65 μJ , la fluence est alors quasiment la même pour chaque motif ($\sim 200 \text{ mJ/cm}^2$). Les taches focales et les marquages associés sont représentés sur la figure 6.10. Un top-hat circulaire, une couronne, un top-hat carré et un triangle sont réalisés, avec des dimensions typiques d'environ 20 μm . La forme et la taille des structures usinées correspond remarquablement à la forme de faisceau utilisée (pour le marquage réalisé avec un faisceau top-hat rond, on retrouve un diamètre de 17 μm , confirmant l'indépendance de la largeur avec la fluence). On n'observe ni redépôt de matière éjectée, ni marquage indésirable en dehors de la zone définie par la forme de la tache focale. Même au défaut de mise en forme du triangle sur le bord supérieur gauche* correspond une petite marque sur l'échantillon. Ceci démontre qu'un usinage extrêmement précis peut être accompli par l'intermédiaire d'une maîtrise tout aussi précise du faisceau. Ceci requiert un réglage fin du positionnement de l'échantillon dans

* dû à la difficulté d'obtenir une bonne mise en forme avec une forme aussi dissymétrique.

le plan de meilleure mise en forme du faisceau. Cette latitude de réglage est de l'ordre d'une vingtaine de microns avec l'objectif de microscope utilisé ($\times 8$, $ON=0.25$, $f'=25$ mm).

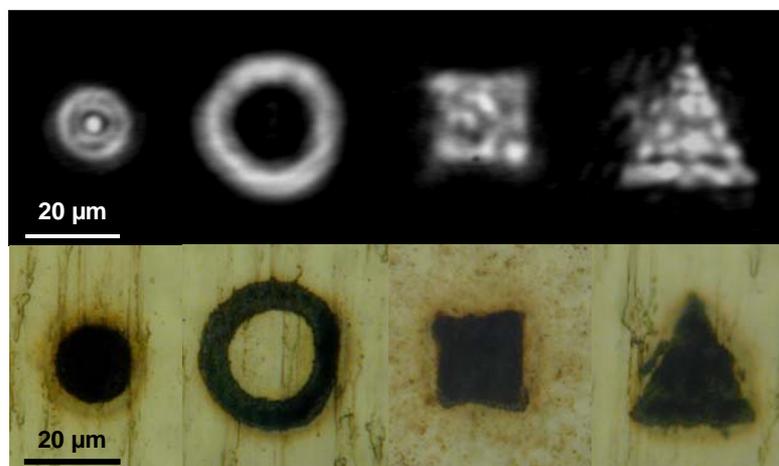


Figure 6.10 – Ligne du haut : forme du faisceau au point focal. Ligne du bas : résultats de marquage correspondants dans l'inox. Chaque motif est irradié par $5 \cdot 10^4$ impulsions de 130 fs à 100 kHz, avec une fluence de ~ 200 mJ/cm². La taille typique des structures est 20 µm. L'accord entre la forme de faisceau et la forme des motifs est excellent.

L'étude de la profondeur de telles structures est très délicate. Plusieurs analyses avec différents types de profilomètres (mécaniques et optiques) n'ont pas permis de fournir des résultats exploitables. Un système d'interférences en lumière blanche pour mesurer la topographie de la surface a également été testé, mais le problème récurrent est qu'aucune lumière n'est réfléchiée par la partie de la surface occupée par les motifs. Une analyse au microscope à force atomique permettrait sans doute de procurer des informations quantitatives. Afin de disposer quand même d'un aperçu de l'état de surface, des clichés MEB ont été réalisés (figure 6.11). La structure interne de la zone irradiée n'est pas uniforme, elle semble correspondre relativement bien aux inhomogénéités d'intensité du faisceau laser utilisé pour le marquage, donnant ainsi une piste pour des améliorations futures. La profondeur est comprise dans une fourchette de 100 nm à 1 µm.

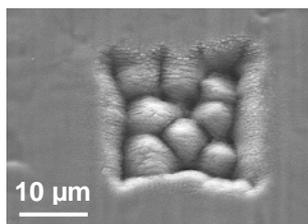


Figure 6.11 – Détails de la structure du marquage réalisé dans l'inox avec un faisceau laser carré. Conditions expérimentales : $5 \cdot 10^4$ impulsions, 130 fs, 100 kHz, fluence ~ 200 mJ/cm².

Bien que cette thématique sorte du travail de thèse présenté ici, des études plus poussées avec des moyens d'analyse adaptés seraient intéressantes à mener, pour envisager la possibilité de contrôler précisément l'uniformité et la profondeur de telles structures. Ceci permettrait de franchir le pas entre la micro- et la nano-structuration de surface, dont l'industrie est actuellement fortement demandeuse, avec des applications concrètes comme par exemple pour l'amélioration de la lubrification de surfaces [136]. D'autres utilisations encore plus immédiates du micro-marquage par laser femtoseconde pourraient voir le jour, grâce aux récents résultats de résistance à la corrosion des marquages femtosecondes [137]. Ceci permettrait par exemple de répondre aux besoins de traçabilité de matériel médical (bistouris, pinces...), tout en garantissant la stérilité des instruments.

6.5.2 Micro-structuration de surface

Pour une densité surfacique d'énergie laser supérieure au seuil de dommages du matériau, des structures plus profondes peuvent être usinées. Nous avons ici utilisé l'énergie maximale délivrée par la source femtoseconde, conduisant à $1.5 \mu\text{J}/\text{impulsion}$ sur l'échantillon après traversée du système de mise en forme. La figure 6.12 présente l'usinage d'un top-hat circulaire, un top-hat carré et une couronne sur un échantillon d'inox. Les analyses au profilomètre mécanique et optique n'ont pas permis de mesurer avec certitude la profondeur des trous. D'après nos études au microscope électronique à balayage, la profondeur est estimée au minimum à une quinzaine de microns pour les deux motifs top-hat, et un peu moins pour la couronne. Les pentes du carré sont très raides, illustrant la bonne qualité d'usinage.

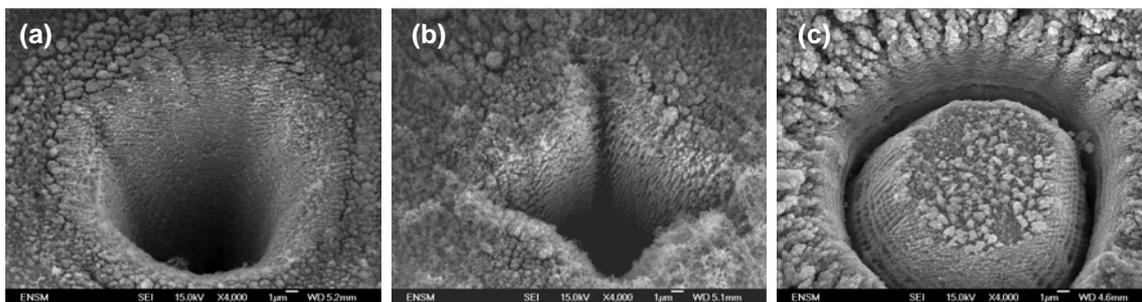


Figure 6.12 – Micro-usinage sur l’inox avec une tache focale mise en forme : (a) top-hat circulaire, (b) top-hat carré, (c) couronne (images MEB). Chaque motif est usiné par 5.10^4 impulsions de 130 fs et $1.5 \mu\text{J}$ à 100 kHz, soit des fluences correspondantes respectivement pour les trois motifs de 660, 480, et $380 \text{ mJ}/\text{cm}^2$.

On peut noter la bonne reproductibilité des motifs (figure 6.13), le caractère précis de l’interaction laser-matière étant ainsi bien mis en valeur. Cette technique de mise en forme de tache focale permet donc de creuser des trous de forme complexe, et ceci de manière programmable en temps réel, offrant ainsi de nouvelles possibilités à l’outil déjà performant que constitue une chaîne laser femtoseconde haute cadence. Ces résultats sont également protégés par le brevet qui a été déposé sur ce travail [52].

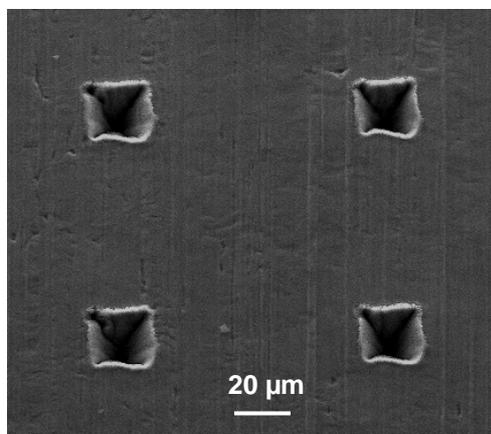


Figure 6.13 – Reproductibilité des usinages de trous carrés obtenus grâce à la mise en forme de faisceau. Chaque motif est irradié par 5.10^4 impulsions de 130 fs et $1.5 \mu\text{J}$ à 100 kHz, soit une fluence de $480 \text{ mJ}/\text{cm}^2$ (inox).

6.6 Ondulations de surface ou "ripples"

Dans les résultats exposés précédemment, il est possible d'observer l'apparition de structures particulières consécutivement à l'irradiation laser. Sur les figures 6.6 et 6.12, on discerne aisément la présence d'ondulations de surface sur les flancs des trous, connues sous le nom de "ripples" (que l'on pourrait traduire imparfaitement par "rides"). L'apparition de ripples est inévitable lorsque les dimensions d'usinage sont de l'ordre de la longueur d'onde. De nombreuses études sont actuellement menées sur ce sujet car il semble exister de nombreux types de ripples (voir par exemple [138, 139] et références incluses). De manière générale, les ripples semblent apparaître pour un grand nombre d'impulsions et une fluence très basse, voire même inférieure au seuil de dommages [140]. L'origine de la formation de ces structures reste encore obscure malgré les liens évidents entre, d'une part leur périodicité et la longueur d'onde laser, et d'autre part leur orientation et la polarisation du laser.

Sur la figure 6.14, on peut observer des stries verticales ou horizontales sur les flancs des motifs usinés. Ces ripples sont similaires dans les deux cas, bien que résultant de conditions d'usinage différentes : usinage en mouvement avec un point focal gaussien pour la figure 6.14.a et usinage ponctuel avec une tache focale carrée pour la figure 6.14.b. Lorsque l'on expose la zone à un grand nombre d'impulsions, ou de manière équivalente à un grand nombre de passages lors d'usinage en mouvement, on observe une organisation extrêmement rigoureuse sur les flancs de la zone ablatée. Ces structures exhibent une organisation à l'échelle sub-longueur d'onde avec une période de ~ 200 nm soit $\sim \lambda/4$. Ces ripples pourraient provenir d'un phénomène d'auto-organisation lors de la relaxation de l'état largement hors-équilibre atteint après l'émission de matière [141], ce qui permettrait d'expliquer la périodicité en λ/n . Sur les deux clichés, on peut observer une particularité surprenante concernant l'orientation des ripples : selon la face considérée, les ripples sont orientées soit horizontalement, soit verticalement. Les flèches rouges représentent la direction de polarisation du faisceau laser. Sur la face parallèle à la polarisation, les ripples se développent dans la profondeur du matériau, c'est-à-dire perpendiculairement à la surface (zone 1 sur le cliché 6.14.a). A l'inverse, sur la face perpendiculaire à la polarisation, les ripples croissent parallèlement à la surface du matériau (zone 2). Le même phénomène est observé sur deux faces voisines de l'usinage 6.14.b. Le point clé provient du fait qu'à chaque fois, la direction des ripples reste toujours perpendiculaire à la polarisation du

laser. Il semble donc possible de contrôler l'orientation des ripples dans la profondeur simplement par le choix de la direction de polarisation du faisceau.

Ce résultat original n'est pas mentionné dans la littérature, car les ripples sont étudiées sur des motifs circulaires. De fait, il est difficile de faire une telle observation sur le trou rond de la figure 6.12.a. L'opportunité de pouvoir disposer d'un faisceau carré nous a permis de mettre en évidence ce comportement singulier. Ces résultats sortant des objectifs de notre travail, l'analyse n'a pas été poussée plus avant. Néanmoins, il semble très intéressant de poursuivre dans cette direction pour caractériser plus précisément ce nouveau type de ripples. En effet, les ripples ne constituent pas toujours un point négatif ! L'intérêt que procure la possibilité de réaliser une nano-structuration de surface contrôlée a déjà été démontré, par exemple avec la réalisation de micro-pointes sur silicium [142] pour augmenter la gamme spectrale de sensibilité des photo-détecteurs silicium [143]. De nouvelles applications pourraient certainement voir le jour avec un contrôle accru de ces nanostructures.

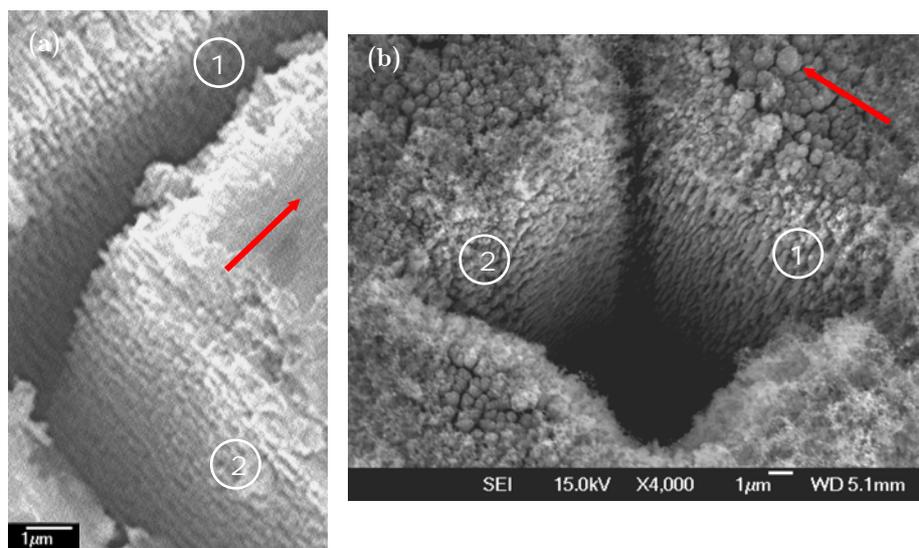


Figure 6.14 – Observation de ripples sur les flancs de la zone ablatée, avec une organisation à l'échelle sub-micronique (périodicité ~ 200 nm soit $\sim \lambda/4$). Les deux usinages sont réalisés avec des impulsions de 130 fs à 100 kHz, la polarisation du laser est indiquée par des flèches rouges. L'usinage (a) est réalisé par translation de l'échantillon avec un faisceau gaussien, l'usinage (b) est obtenu par usinage ponctuel avec un faisceau top-hat carré. Dans les deux cas, les ripples sont orientées orthogonalement sur deux faces voisines, de manière perpendiculaire (zone 1) ou parallèle (zone 2) à la surface du matériau. Quelle que soit la face considérée, les ripples sont systématiquement perpendiculaires à la polarisation laser.

6.7 Conclusions

Dans ce chapitre, nous nous sommes attachés à mettre en valeur les avantages d'une mise en forme spatiale de faisceau pour le micro-usinage femtoseconde de surface. L'intérêt principal du micro-usinage laser femtoseconde réside dans la qualité du résultat. Les taux d'ablation les plus élevés (donc la meilleure efficacité) sont obtenus au point focal d'un objectif de focalisation, mais au détriment de la qualité d'usinage à cause des aberrations du faisceau. L'utilisation du dispositif d'optique adaptative présenté dans la partie I de ce manuscrit s'avère être fructueuse sur le plan des applications, afin d'améliorer et de contrôler l'usinage au point focal.

La correction active de front d'onde procure un point focal limité par diffraction, avec un contrôle en temps réel. Un tel faisceau libre de toute aberration offre l'opportunité de pouvoir réaliser un usinage de grande qualité au point focal. Ceci a été démontré par l'usinage de trous de $1.7 \mu\text{m}$ correspondant à la limite de diffraction sur deux types de matériaux : un métal à faible seuil d'ablation (inox) et un diélectrique à seuil élevé (rubis). En outre, le contrôle de la phase permet de concentrer au maximum l'énergie du faisceau et donc d'étendre les possibilités d'usinage à des matériaux présentant un seuil d'ablation élevé. Ce dispositif a permis de réaliser l'usinage en profondeur d'un motif carré de petites dimensions ($15 \mu\text{m}$) et de grande qualité grâce la maîtrise précise de la forme et des dimensions du point focal.

L'utilisation d'un faisceau top-hat a ensuite permis de démontrer l'amélioration de la qualité d'usinage apportée par la mise en forme du faisceau. Un découplage entre le diamètre du trou et l'énergie par impulsion a ainsi été établi, de même qu'une indépendance vis-à-vis du nombre d'impulsions. Le résultat important est que la forme et la taille du motif usiné sont en très bonne adéquation avec la forme du faisceau. Ceci permet une meilleure maîtrise des procédés, avec une amélioration de la qualité et de la précision d'usinage.

Le dispositif de mise en forme permet à la fois de contrôler le *profil* du faisceau (gaussien ou top-hat), c'est-à-dire la raideur des bords pour une bonne qualité d'usinage, et permet également de contrôler la *forme* du faisceau. Grâce au système adaptatif qui a été développé, la gamme de motifs accessibles est très large, avec un changement de motif immédiat par contrôle informatique. Suivant l'énergie utilisée, des applications de marquage ou de microstructuration de surface sont accessibles. Le micro-marquage et le micro-usinage direct de structures rondes, carrées ou annulaires de $\sim 20 \mu\text{m}$ de diamètre a notamment été démontré. Cette capacité de contrôle de la

zone d'interaction laser-matière a également permis de mettre en évidence une caractéristique plus fondamentale : des oscillations de surface ("ripples") d'orientation différentes apparaissent sur les flancs de trous usinés, leur direction étant gérée par l'orientation de la polarisation laser.

De plus, l'utilisation d'une source laser haute cadence (100 kHz) permet d'envisager la réduction des temps de process. C'est pourquoi l'intégration d'un tel module de mise en forme de faisceau dans les stations d'usinage laser femtoseconde pourrait être très bénéfique [52]. En effet, d'un point de vue industriel, disposer d'un point focal dont la forme est précisément contrôlée et surtout choisie par l'utilisateur présente un intérêt indéniable. Avant une éventuelle phase de transfert industriel, il faudra évidemment optimiser le contrôle informatique pour des raisons de gain de temps, ainsi que la boucle de rétroaction sur la phase pour s'affranchir des problèmes de résolution spatiale.

En résumé, en fonction de l'application visée, la correction de front d'onde permet l'usinage à la limite de diffraction, tandis que la mise en forme programmable de faisceau fournit l'opportunité d'usiner des motifs variés avec une bonne qualité. Ces résultats ouvrent la perspective d'un micro-usinage rapide, précis, avec un contrôle accru de la zone interaction laser-matière pour une qualité d'usinage significativement améliorée.