

## Modélisation du polissage des verres par laser CO<sub>2</sub>

Le polissage par laser est relativement simple dans son principe: la radiation laser absorbée par un substrat chauffe une mince couche en surface jusqu'à la température de fusion (e.g. métaux) ou au-delà de la température de transition vitreuse (e.g. verres de silice), température à laquelle la viscosité de cette couche est suffisamment réduite pour permettre un écoulement latéral par tension de surface de matériau fondu. Ainsi, les rugosités de la surface s'en trouvent fortement atténuées, laissant une surface polie après refroidissement.

Dès les années 1980, des travaux de recherche étaient publiés sur le développement et la mise en oeuvre de techniques de polissage des verres par laser CO<sub>2</sub>. Le principal sujet étudié à l'époque était l'augmentation du seuil de dommage en surface des composantes optiques (e.g. lentilles, fenêtres, etc.) utilisées avec les lasers de puissance. En effet, comparativement aux techniques de polissage mécaniques usuelles, le polissage laser CO<sub>2</sub> a le potentiel de réduire le nombre de rayures en surface ou de microfissures sous la surface, sources d'endommagement et de réduction de la résistance au flux optique. Par contre, une des difficultés inhérentes à la technique, déjà identifiée à l'époque, tient à la présence intrinsèque de gradients thermiques qui sont à la source de contraintes thermiques induites dans les substrats de verre et qui mènent à la création de fissures, en particulier dans le cas des verres à coefficient de dilatation élevé. Les avantages potentiels de l'approche laser pour polir les verres s'en trouvent donc annulés.

Depuis 10 ou 15 ans, plusieurs améliorations à la technique ont été proposées afin d'améliorer les résultats du polissage des verres par laser CO<sub>2</sub>, en particulier de la silice fondue, le verre le plus favorable à cause de sa pureté chimique et de son très faible coefficient de dilatation thermique. Ce regain d'intérêt a notamment été engendré par les applications nécessitant la fabrication d'optiques de très petites dimensions ou dont les surfaces sont asphériques ou de forme libre (*free-form optics*). Dans de tels cas, les techniques de polissage mécanique usuelles sont mal adaptées ou impossibles à mettre en oeuvre, trop lentes et trop exigeantes en termes de main-d'oeuvre. Le polissage par laser a l'avantage d'être une technique sans contact facilement automatisable, aisément adaptable à la plupart des géométries et beaucoup plus rapide que le polissage mécanique (potentiellement d'un facteur supérieur à 10). Parmi ces améliorations, l'uniformisation du profil spatial du faisceau laser et le balayage rapide d'un faisceau laser à profil spatial gaussien ont été mis en oeuvre par certains groupes afin de réduire le gradient thermique latéral induit par le chauffage laser. D'autres encore ont introduit le chauffage du substrat à polir (utilisation d'une plaque chauffante, d'un four à convection ou chauffage par rayonnement micro-onde) afin d'opérer

à une température initiale plus élevée que la température ambiante (typiquement quelques centaines de degrés Celsius), limitant ainsi les gradients thermiques induits par le rayonnement laser. D'autres enfin ont introduit des séquences d'impulsions laser plutôt que d'utiliser un faisceau laser continu afin de limiter la charge thermique sur le substrat à polir.

Les approches décrites ci-dessus ont permis d'améliorer les résultats de polissage laser, mais des limites persistent. Ainsi, les contraintes thermiques résiduelles créent une distorsion du substrat poli par laser et causent de la biréfringence, ce qui empêche la mise en oeuvre de la technique pour les optiques d'imagerie. Dans le cas des verres à coefficient de dilatation thermique plus élevé, cela mène à la destruction du substrat à polir. Enfin, la charge thermique induite par l'absorption optique du faisceau laser dans le substrat à polir dépend évidemment de ses dimensions. En conséquence, l'ensemble des paramètres pertinents au procédé de polissage laser d'un matériau donné pourrait devoir être adapté à chaque nouvelle dimension de substrat, ce qui complique grandement l'automatisation du procédé. Il est par ailleurs remarquable que les travaux relatifs à la modélisation du polissage par laser soient relativement peu nombreux. L'approche empirique a été privilégiée par la majorité des groupes de recherche, et la modélisation se limite habituellement au calcul du champ de température induite (souvent en 1-D!) par l'absorption optique d'un rayonnement laser continu dans un substrat semi-infini. On fait ensuite l'hypothèse que la température de surface détermine la viscosité du verre. Le calcul permet alors de déterminer les paramètres du laser (puissance, diamètre du faisceau, temps d'interaction, etc.) nécessaires à l'atteinte de la température (caractéristique de chaque verre) à laquelle la viscosité en surface est suffisamment faible pour permettre le polissage. Or les phénomènes physiques impliqués sont, dans les faits, beaucoup plus complexes: le coefficient d'absorption d'un verre donné dépend de la longueur d'onde  $\lambda$  du laser.

Or presque tous les travaux publiés sur le polissage laser des verres ont été effectués à  $\lambda=10,6 \mu\text{m}$  et il serait intéressant d'étudier l'effet de  $\lambda$  sur les résultats de polissage. Toutes les propriétés physiques d'un verre donné varient avec la température. Ainsi les paramètres de l'interaction laser-matière, y compris le coefficient d'absorption, varient-ils fortement en cours de chauffage par le laser et cet important effet est rarement pris en compte dans les modèles. Les taux de chauffage et surtout de refroidissement sont très rarement pris en compte. Puisque le volume spécifique final d'un verre est dépendant du taux de refroidissement de part et d'autre de la température de transition vitreuse, ce paramètre a un effet crucial sur les contraintes thermiques résiduelles dans le substrat qu'il serait important de modéliser. Les pertes thermiques par convection et par radiation ne sont jamais prises en compte dans les modèles. Les dimensions physiques du substrat de verre

à polir ne sont jamais prises en compte et les modèles font généralement l'hypothèse du solide semi-infini. Or ces dimensions influencent fortement la charge thermique induite dans le substrat par le chauffage laser. La prise en compte du couplage entre les équations de la chaleur et de la déformation mécanique du substrat de verre est rare dans les travaux publiés alors qu'elle permettrait de déterminer les contraintes mécaniques d'origine thermique qui causent la rupture (création de fissures), la distorsion ou la biréfringence du substrat de verre. L'écoulement viscoélastique du verre, le phénomène physique principal à l'origine de l'effet de relaxation des aspérités de la surface (et donc du polissage), est rarement modélisé dans les publications, où l'on s'en tient généralement à une relation empirique entre la viscosité et la température du verre et où l'on fixe arbitrairement la viscosité seuil pour un écoulement du verre à  $10^3 \text{ Pa s}$  ( $T$  est approximativement  $2450$  degrés Celsius). Il serait pertinent de modéliser ce phénomène et surtout sa capacité à réduire la rugosité de surface en fonction de la période spatiale des aspérités.

Ainsi donc, le défi est le suivant: peut-on modéliser, en 3-D, le polissage d'un verre (aux propriétés physiques données) par laser pour un substrat aux dimensions finies, en prenant en compte le couplage des équations thermoviscoélastiques (y compris l'écoulement) et de la chaleur (y compris les pertes par convection et radiation) de même que la variation des propriétés physiques en fonction de la température? La source de chaleur sera un faisceau laser absorbé en volume par le substrat de verre dont on pourra faire varier, a priori de façon arbitraire, les paramètres suivants: la longueur d'onde, la puissance moyenne (en mode continu) ou la puissance crête, la durée d'impulsion et le taux de répétition (en mode impulsif), le diamètre et le profil spatial du faisceau (e.g. gaussien, uniforme carré, rectangulaire ou circulaire) et la vitesse de déplacement relative entre le faisceau laser et le substrat de verre selon deux directions perpendiculaires. Il semble clair qu'il faudra, pour ce faire, résoudre ce système d'équations non linéaires (en fonction de la température) couplées par des méthodes numériques. Nous n'avons a priori aucune exigence quant au choix des outils numériques ou du temps de calcul nécessaire à la résolution des équations. En principe, une plateforme comme COMSOL Multiphysics (qui nécessite l'achat d'une licence) pourrait permettre de résoudre le problème. Toutefois, un programme dédié en Matlab ou en Python (langages maîtrisés à l'INO) est tout à fait acceptable pour nous.

L'objectif, à la fin de l'atelier, serait d'avoir un modèle relativement complet qui nous permettra de simuler différents régimes de chauffage par laser et de déterminer les paramètres qui optimisent la rugosité de surface pour toutes les périodes spatiales tout en minimisant les contraintes thermiques résiduelles dans le substrat de verre considéré. Les résultats générés par ce modèle nous serviront ensuite à planifier le développement expérimental du

procédé de polissage de verres par laser CO2.