

# Évaluation de la conductivité thermique de la silice à haute température

P. COMBIS / CEA–DAM Île-de-France

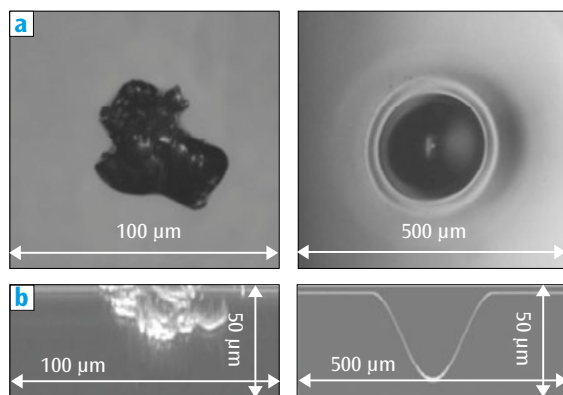
P. CORMONT - D. HÉBERT - L. ROBIN - J.-L. RULLIER / CEA – Cesta

L. GALLAIS / Institut Fresnel, UMR 6133 CNRS - Université Aix-Marseille - École centrale Marseille

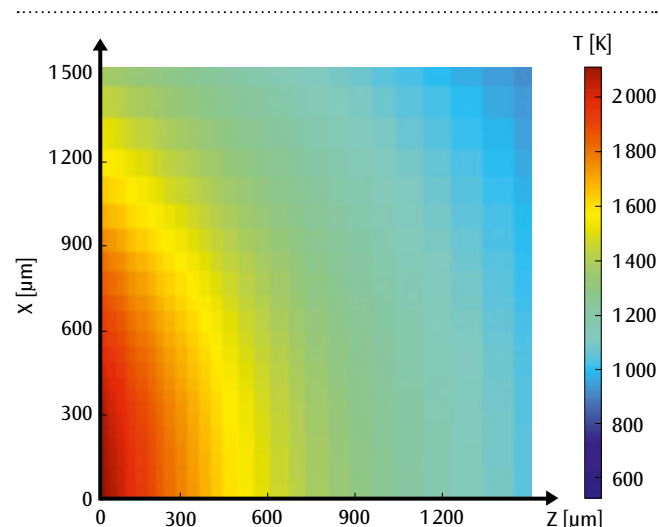
Les grandes optiques en silice des lasers de puissance présentent inévitablement quelques défauts de surface dès leur fabrication et après utilisation. Irradier la silice avec un laser CO<sub>2</sub> à la longueur d'onde de 10,6 μm, pour laquelle la silice est fortement absorbante, permet un recuit capable de réparer ces dommages. Nous avons ainsi développé un code permettant de modéliser la transformation d'une surface en silice illuminée par un laser CO<sub>2</sub>. Les paramètres physiques de la silice sont connus entre 300 K et 2000 K, excepté la conductivité thermique. Pour l'évaluer, la température surfacique d'un échantillon de silice a été mesurée par thermographie infrarouge et comparée à des simulations qui permettent, par approches successives, de déterminer une valeur correcte de cette conductivité.

Dans le cadre des études sur la résistance à l'endommagement des optiques en silice du Laser Mégajoule (LMJ), nous travaillons sur la réparation des défauts de surface par fusion au moyen d'un laser CO<sub>2</sub>. Un exemple de ce procédé est illustré sur la **figure 1**. Le dommage, généré par l'impulsion d'un laser de puissance, présente une fracturation sous-surfacique importante qui va croître sous l'effet des impulsions suivantes. Par contre, la transformation de ce même site après chauffage par une ou deux irradiations au laser CO<sub>2</sub>, le rend résistant aux intensités lumineuses atteintes sur les lasers de puissance tels que le LMJ [1] ou le NIF.

Dans le but de modéliser l'interaction du laser CO<sub>2</sub> avec la surface de l'optique en silice et d'inter-



**Figure 1.** Réparation d'un dommage par laser CO<sub>2</sub>. (a) : vue de dessus au microscope optique classique - (b) : vue transverse sous la surface (microscopie confocale).



**Figure 2.** Cartographie 3D (profondeur suivant z, position radiale suivant x) de la température (en K) à la fin de l'impulsion laser (t = 1 s).

préter les expériences réalisées avec ce laser, nous avons développé un code 2D, axi-symétrique (code BERENICE). Dans ce code, la cible en verre est décrite avec quelques milliers de mailles quadrangulaires dont la dimension caractéristique vaut 10 μm au niveau du foyer du laser pour atteindre 200 μm loin de la zone de dépôt. Ce dépôt d'énergie par laser est modélisé au moyen d'une centaine de rayons tels que la composition des énergies de chaque rayon permet de restituer le profil spatial gaussien de la tâche laser au niveau de la surface irradiée. La diffusion de l'énergie apportée par le laser dans l'ensemble de la cible

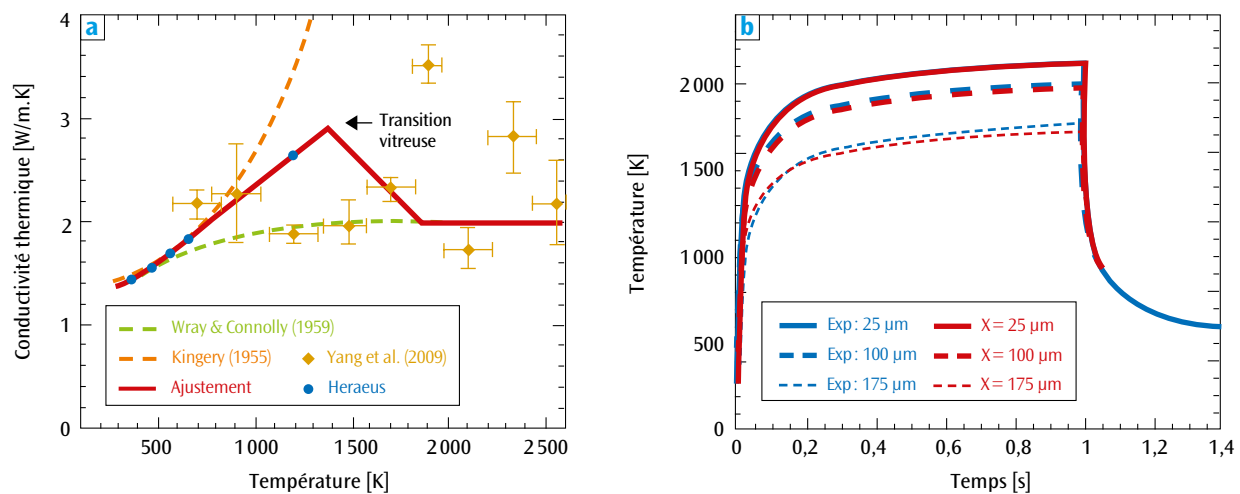


Figure 3. (a) : Comparaison des différentes valeurs de la conductivité thermique – (b) : Comparaison expérience-théorie des profils temporels de température pour une irradiation de 1 s à 5,3 W sur un diamètre de 700 μm.

est modélisée par la résolution numérique de l'équation de la chaleur. Pour affiner les simulations, nous modélisons aussi la perte d'énergie due à l'émission radiative au niveau de la surface air-verre. À titre d'exemple, nous présentons, sur la [figure 2](#), une cartographie de la température d'une cible de silice irradiée à puissance constante (5,3 W) avec une tâche laser de diamètre 700 μm.

Dans nos expériences et nos simulations, la densité de la silice varie assez peu autour de sa valeur standard (2,2 g/cm<sup>3</sup>) puisque la température n'excède pas 2100 K. D'autre part, les pressions induites restent très proches de la pression atmosphérique initiale. Il n'est donc pas nécessaire de modéliser le mouvement de la matière. Les données physiques nécessaires à la modélisation sont finalement assez limitées : l'indice optique complexe à 10,6 μm en fonction de la température à densité standard fourni par Mac Lachlan [2], la capacité calorifique à pression constante (1 atm) en fonction de la température, fournie par les tables NIST-JANAF et, enfin, la conductivité thermique à densité standard pour des températures variant entre 300 K et 2500 K. Pour cette dernière, nous disposons, d'une part, des valeurs fournies par le fabricant (Heraeus) pour des températures inférieures à 1200 K et, d'autre part, de différentes séries de valeurs trouvées dans la littérature [3] représentées sur la [figure 3a](#).

Nous avons mesuré, par thermographie infrarouge [4], la variation spatio-temporelle du profil de température sous irradiation par laser CO<sub>2</sub>. La restitution correcte par les simulations de ces profils temporels expérimentaux de température à différentes distances du centre de la tâche focale ([figure 3b](#)),

nous a imposé une loi de variation de la conductivité thermique présentant une décroissance à partir de 1400 K (transition vitreuse) puis une stabilisation vers 1900 K. Ce comportement, signalé dans une publication récente [5], n'avait encore jamais été observé.

Ainsi, une approche itérative originale, associant des mesures expérimentales et des simulations numériques, nous a permis de déterminer la variation de la conductivité thermique de la silice dans un domaine de température (1200-2000 K) où elle était mal connue.

## Références

- [1] P. CORMONT, L. GALLAIS, L. LAMAIGNERE, J.-L. RULLIER, P. COMBIS, D. HEBERT, "Impact of two CO<sub>2</sub> laser heatings for damage repairing on fused silica surface", *Opt. Exp.*, **18**, 26068 (2010).
- [2] A.D. Mc LACHLAN, F. P. MEYER, "Temperature dependence for the extinction coefficient of fused silica for CO<sub>2</sub> laser wavelengths", *Appl. Opt.*, **26**, p. 1728-1731 (1987).
- [3] S. T. YANG, M. J. MATTHEWS, S. ELHADJ, V. G. DRAGGOO, S. E. BISSON, "Thermal transport in CO<sub>2</sub> laser irradiated fused silica : In situ measurements and analysis", *J. Appl. Phys.*, **106**, 103106 (2009).
- [4] L. ROBIN, P. COMBIS, P. CORMONT, L. GALLAIS, D. HEBERT, C. MAINFRAY, J.-L. RULLIER, "Infrared thermometry and interferential microscopy for analysis of crater formation at the surface of fused silica Under CO<sub>2</sub> laser irradiation", *J. Appl. Phys.*, **111**, 063106 (2012).
- [5] P. COMBIS, P. CORMONT, L. GALLAIS, D. HEBERT, L. ROBIN, J.-L. RULLIER, "Evaluation of the fused silica thermal conductivity by comparing infrared thermometry measurements with two-dimensional simulations", *Appl. Phys. Lett.*, **101**, 211908 (2012).