

Ablation de matériaux par laser femtoseconde

S. Bruneau, J. Hermann, T. Itina, M. Sentis, A. Semerok¹ et W. Marine²

LP3, FRE 2165 du CNRS, Faculté des Sciences de Luminy, Case 917,
13288 Marseille cedex 9, France

¹ CEA-Saclay, DPC/SCPA/LALES, bâtiment 391, 91191 Gif-sur-Yvette cedex, France

² GPEC, UMR 6631 du CNRS, Faculté des Sciences de Luminy, Case 901,
13288 Marseille cedex 9, France

Résumé: L'ablation de métaux par laser impulsionnel ultrabref (femtoseconde) est étudiée en analysant les cratères par microscopie optique. La profondeur du cratère a été mesurée en fonction du nombre d'impulsions et de la fluence. Les résultats sont comparés à un modèle analytique décrivant l'interaction laser-matière en régime femtoseconde.

1. INTRODUCTION

Des sources laser femtosecondes compactes et fiables existent depuis peu de temps et un champ très vaste d'applications s'est ouvert. Des puissances crêtes élevées de 10^7 W pour des impulsions d'énergie de quelques millijoules et des durées de 100 fs permettent obtenir des densités de puissances instantanées de l'ordre de 10^{14} W cm⁻² après focalisation. Une application de ces lasers est le micro-usinage. Du fait d'une courte durée d'impulsion, la zone affectée thermiquement est très petite et des effets thermiques réduits entraînent une amélioration de la qualité de surface des parois du cratère et moins de débris sur la surface environnante.

Cependant, si des nouvelles applications se développent, les principes fondamentaux régissant l'ablation en régime femtoseconde restent encore méconnus. Ainsi, les présentes mesures de seuils et de taux d'ablation contribuent à une meilleure compréhension de l'ablation laser dans le régime femtoseconde, compréhension requise afin d'optimiser les procédés de micro-usinage et autres applications.

2. MONTAGE EXPERIMENTAL

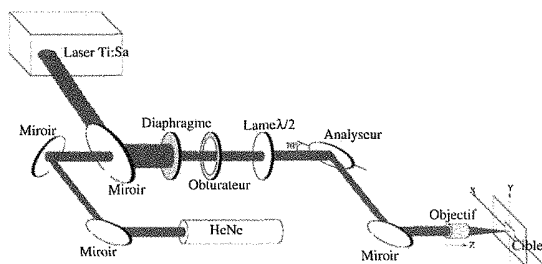


Figure 1 – Dispositif expérimental

Un schéma du dispositif expérimental est présenté sur la figure 1. L'ablation des matériaux est produite par un laser Titane-Saphir (SpectraPhysics, modèle Hurricane) délivrant des impulsions de durée de 100 fs à 800 nm (largeur spectrale 10 nm) avec un maximum d'énergie de 1 mJ. Le faisceau laser est polarisé linéairement. La fréquence de répétition est de 1 kHz. Un diaphragme d'ouverture 1.5 mm

permet de sélectionner la partie la plus uniforme du faisceau gaussien de diamètre 6 mm.

L'énergie est variée à l'aide d'une lame $\lambda/2$ suivie d'un analyseur en réflexion. En faisant tourner la lame $\lambda/2$ et par conséquent la polarisation, l'énergie disponible pour l'ablation est variée de 0 à 40% de l'énergie totale. Afin de réaliser l'ablation, le faisceau est focalisé sur la cible à l'aide d'un objectif de microscope à longue distance de travail (10 mm) et de grandissement $\times 20$. Le positionnement de la cible ainsi que celui de l'objectif sont réalisés à l'aide d'axes de translation motorisés avec une résolution de 1 μm . Un obturateur mécanique contrôle le nombre d'impulsions incidentes. Les axes de translations ainsi que l'obturateur sont contrôlés par ordinateur. Les expériences sont réalisées sous atmosphère ambiante. Les cratères obtenus sont caractérisés à l'aide d'un microscope optique (Zeiss, modèle Axiotech). La fluence est calculée à partir de la mesure du diamètre des cratères et les profondeurs indiquées correspondent à des profondeurs moyennes.

3. RESULTATS ET DISCUSSIONS

La profondeur ablatée en fonction du nombre de impulsions est présentée sur la figure 2. Une relation linéaire entre ces deux paramètres est observée pour de faibles profondeurs quand le rapport profondeur/diamètre < 1 . Du fait de cette relation linéaire, les taux d'ablations L sont alors déterminés pour différentes énergies du faisceau à partir de la pente. On obtient 9 et 43 nm pulse^{-1} respectivement pour 0.25 et 1.3 J cm^{-2} .

Le taux d'ablation en fonction de la fluence pour le cuivre est représenté sur la figure 3. Deux régimes d'ablation (1) et (2) sont distingués. Ces deux régimes d'ablation peuvent être décrits par une loi logarithmique $L = l_i \ln(F/F_i)$ avec $i=1$ pour le régime de basse fluence et $i=2$ pour celui de haute fluence. La signification physique des paramètres l_i et F_i a été proposé par Nolte *et al*

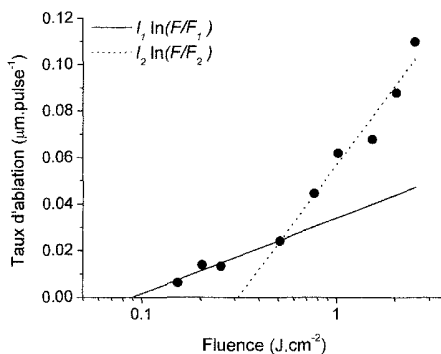


Figure 3 – Taux d'ablation en $\mu\text{m.pulse}^{-1}$ en fonction de la fluence en J.cm^{-2} pour le cuivre.

Le premier seuil est obtenu par la relation $F_\delta = \rho L_v \delta$ où ρ est la densité et L_v la chaleur d'évaporation et

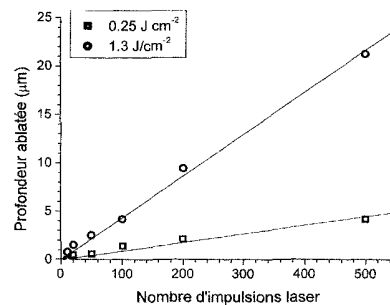


Figure 2 – Profondeur ablatée en fonction du nombre de tir pour une cible en alliage d'or (or de bijouterie)

[1] où un modèle à deux températures [1-4] est utilisé pour décrire le dépôt de l'énergie dans la cible. Initialement, l'énergie laser est absorbée par les électrons et ensuite transférée au réseau par couplage électron-phonon. La désorption de la matière est supposée suivre une loi de type Arrhenius. La résolution analytique de ce modèle conduit à une description logarithmique du taux d'ablation en fonction de la fluence, similaire à celle observée expérimentalement. La résolution de ces équations permet de relier le paramètre l_i à la profondeur de pénétration optique $\delta = c/(\omega k) = \alpha^{-1}$ où α est le coefficient d'absorption. Le premier

correspond au seuil d'ablation habituel. La valeur de l_2 est reliée à la longueur de diffusion électronique. Le second seuil F_2 est donné par la relation $F_2 = F_1 = \rho L_e l$. Les valeurs théoriques et expérimentales des longueurs de pénétration et des seuils sont listées dans le tableau 1. L'accord entre théorie et expérience est satisfaisant.

Une autre méthode pour estimer le seuil d'ablation est la mesure du diamètre Γ du cratère [3]. En effet, pour des fluences proches du seuil d'ablation, le diamètre des cratères produits par des faisceaux laser non-uniforme varie avec la fluence. Si on considère une répartition d'énergie gaussienne de largeur σ , on obtient alors $F_3 = F \exp(-(\Gamma/\sigma)^2)$ soit :

$$\Gamma^2 = \sigma^2 \ln(F/F_3) \quad \text{Eq. 1}$$

La variation du diamètre Γ en fonction de la fluence est représentée sur la figure 4 où la courbe continue est obtenue à partir de l'équation 1.

Les valeurs de seuil d'ablation obtenues par cette méthode sont listées dans le tableau 1 pour le cuivre, l'or et l'aluminium. Elles sont légèrement supérieures à F_δ .

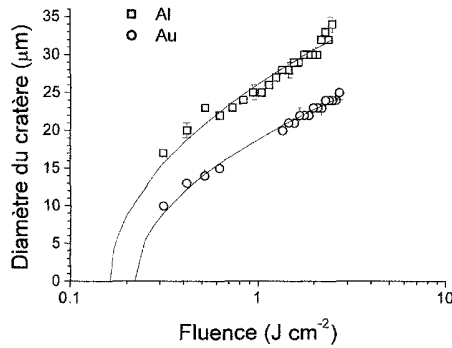


figure 4 - Variation du diamètre du cratère en fonction de la fluence.

Table 1 – Seuils d'ablation et pentes estimées. l_1 , l_2 , F_1 , F_2 sont les paramètres de la description logarithmique, δ et l sont la pénétration optique et la longueur de diffusion électronique, F_δ et F_l sont les seuils théoriques et F_3 le seuil d'ablation obtenu avec la deuxième méthode. Les seuils sont en $J\ cm^{-2}$ et les longueurs en nm.

Métal	l_1/δ	l_2/l	F_1/F_δ	F_2/F_l	F_3
Cu	14/24	49/70	0.09/0.10	0.31/0.30	0.16
Au	-/-	-/-	-/0.09	-/-	0.12
Al	-/-	-/-	-/0.04	-/-	0.09

4. CONCLUSION

L'ablation de métaux par laser femtoseconde a été étudiée en mesurant les taux et les seuils d'ablation. Deux différents régimes d'ablation dépendant de la fluence ont été mis en évidence. Pour les deux régimes, le taux d'ablation en fonction de la fluence est décrit par une loi logarithmique qui est prédite par un modèle théorique proposé par Nolte *et al* [1]. Selon ce modèle, le premier régime est caractérisé par la longueur de pénétration optique et l'habituel seuil d'ablation tandis que le second régime est dû à la diffusion électronique dans le matériau. Dans ce dernier régime, la zone affectée par les effets thermiques augmente fortement avec la fluence, diminuant considérablement la qualité de surface du cratère. Ce régime n'est donc pas compatible avec le micro-usinage de haute précision. Pour une description plus précise des phénomènes d'ablation en régime femtoseconde, des mesures complémentaires et un modèle numérique sont en cours de préparation.

Remerciements

Ce travail a été réalisé dans le cadre de *PIALA (Plate-forme interdisciplinaire Ablation Laser et Application)* financée par la *Direction Générale du développement économique de la Ville de Marseille*.

Références

- [1] Nolte S., Momma C., Jacobs H., Tünnermann A., Chichkov B. N., Wellegehausen B. and Welling H., *J. Opt. Soc. Am. B* 14 (1997) 2716-2722
- [2] Gamaly E. G., Rode A. V., Luther-Davies B. and Tikhonchuk V. T., *Phys. Plasmas* 9 (2002) 949-957
- [3] Hashida M., Semerok A., Gober O., Petite G. and Wagner J.-F., « Ablation thresholds of metals with femtosecond laser pulses », *Nonresonant Laser-Matter Interaction*, S' Petersburg-Pushkin 21-23 august 2000, M. Libenson ed. (Proceedings of SPIE, 2001) 178-185
- [4] Furusawa K., TakaHashi K., Kumagai H., Midorikawa K. and Obara M., *Appl. Phys. A*. 69 [suppl.] (1999) 359-366