

Dynamique sub-picoseconde d'une surface d'aluminium

lors d'une transition solide-liquide induite par laser

C. FOURMENT - F. DENEUVILLE - B. CHIMIER - D. DESCAMPS - F. DORCHIES - O. PEYRUSSE / Centre lasers intenses et applications (CELIA), UMR 5107 CNRS-CEA-Université de Bordeaux, Talence
P. COMBIS - L. VIDEAU / CEA - DAM Île-de-France

La position d'une surface d'aluminium suivant son chauffage par une impulsion laser ultracourte a été mesurée avec une précision nanométrique et une résolution temporelle de l'ordre de 50 femtosecondes (10^{-15} s). La méthode expérimentale repose sur l'interféro-polarimétrie d'un faisceau sonde en réflexion sur la surface étudiée. Les mesures montrent un excellent accord avec le code hydrodynamique 1D ESTHER lorsque l'on décrit correctement la couche d'oxyde d'aluminium présente à la surface de la cible. L'expérience permet en outre la mesure des propriétés optiques (fonction diélectrique) de l'aluminium au cours de sa relaxation après le chauffage. Nous avons ainsi pu caractériser la propagation de l'onde de raréfaction sous la surface d'aluminium.

Focaliser une impulsion laser ultracourte (sub-picoseconde, $< 10^{-12}$ s) à la surface d'un solide est un moyen simple d'amener la matière dans le domaine des plasmas denses dégénérés et corrélés, possédant une haute densité d'énergie. Du fait de la pression très élevée, la matière subit une détente hydrodynamique très rapide, sur une échelle de temps de l'ordre de la picoseconde. La caractérisation de cette détente est nécessaire pour connaître les conditions thermodynamiques du matériau étudié et les voies de relaxation de l'énergie. Cependant, sa rapidité intrinsèque, mise à profit par exemple pour réaliser des découpes de précision (femto-usinage, chirurgie ophtalmique), pose des contraintes fortes sur la résolution temporelle du diagnostic utilisé, qui doit être meilleure que la picoseconde. Ceci interdit l'emploi des diagnostics usuels comme le VISAR [1].

De plus, à cette échelle de temps, le déplacement de la surface est nanométrique, ce qui impose une très grande sensibilité que ne possèdent pas l'ombroscopie ou la radiographie.

Nous avons pu répondre à toutes ces contraintes en réalisant un dispositif d'interférométrie dans le domaine des fréquences (FDI) [2]. Il consiste à mesurer les variations en amplitude et en phase d'une impulsion laser femtoseconde servant de sonde, lors de sa réflexion sur une surface excitée par une autre impulsion laser (pompe), simultanément dans deux directions de polarisation [3]. L'évolution au cours du temps est obtenue en répétant la mesure à différents délais entre la pompe et la sonde. L'utilisation d'un laser à haut taux de répétition (1 kHz) permet une grande reproductibilité des tirs (variations de l'ordre de 1 % en énergie et durée), et un rapport signal

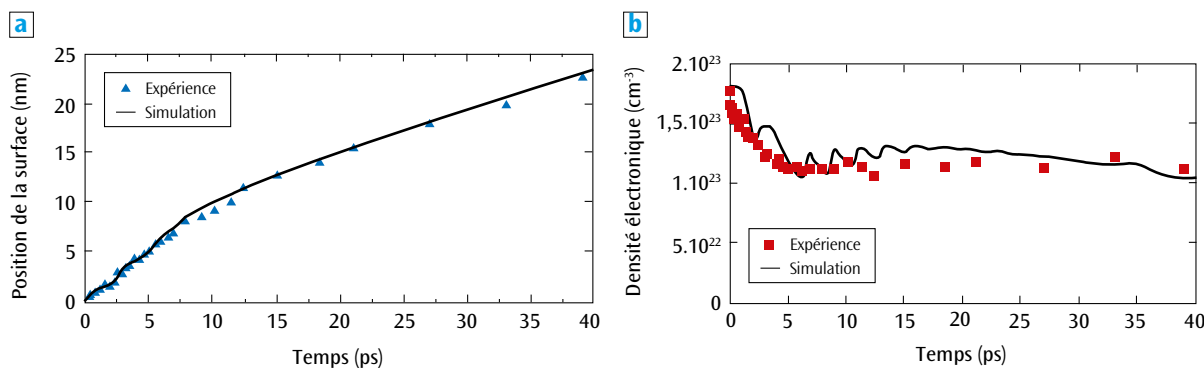


Figure 1. (a) : position de la surface d'aluminium au cours du temps pour une fluence excitatrice de 1 J/cm^2 . (b) : densité électronique effective dans l'épaisseur sondée (points expérimentaux), comparée à celle de la simulation dans une maille initialement située 10 nm sous la surface d'aluminium.

à bruit élevé. L'échantillon étudié est une feuille d'aluminium de 300 nm d'épaisseur déposée sur un substrat en verre. L'impulsion pompe (30 fs, 800 nm) est focalisée dans une tache de 48 μm de largeur à mi-hauteur sur la surface d'aluminium, avec une fluence réglable autour de 1 J/cm^2 . En pratique, une surface d'aluminium est très souvent oxydée. Nous avons mesuré par ellipsométrie la présence d'une couche de 10 nm d'oxyde Al_2O_3 sur nos échantillons. Dans nos conditions expérimentales, cette couche est complètement transparente et ne perturbe pas la mesure, mais nous avons montré qu'elle influence significativement l'évolution hydrodynamique de la cible. Celle-ci est mesurée à partir de la comparaison des données recueillies dans chaque direction de polarisation, qui permet de séparer l'évolution des propriétés optiques du matériau d'une part, et la détente hydrodynamique d'autre part [3,4]. Nous avons pu ainsi mesurer la «raideur» de la surface étudiée (caractérisée par une longueur de gradient de densité électronique) ainsi que sa position avec une précision de 1 nm et une résolution temporelle de 50 fs, pour deux fluences d'excitation : 0,5 J/cm^2 et 1 J/cm^2 . Dans les deux cas, la surface d'aluminium reste très raide (longueur de gradient inférieure à 1 nm) pendant toute la durée observée (40 ps). D'autre part, la surface se déplace vers le vide à une vitesse de l'ordre de 1 nm/ps croissante avec la fluence excitatrice, et subit un ralentissement après quelques picosecondes.

La confrontation de nos observations avec des simulations du code hydrodynamique à deux températures ESTHER [5] montre le rôle de la couche d'oxyde en surface de l'échantillon. En effet, pour la fluence de 1 J/cm^2 , la pression électronique dans l'aluminium est telle que sans la couche d'oxyde, la surface devrait perdre sa cohésion et un gradient de densité de plusieurs nanomètres s'établir en moins d'une picoseconde. Du fait de son inertie, la couche d'oxyde empêche la formation de ce gradient, en accord avec l'observation. De même, le ralentissement de l'expansion de la surface après quelques picosecondes est reproduit en tenant compte de la résistance mécanique qu'oppose la couche d'oxyde à la déformation qui accompagne le déplacement de la surface (effet de membrane). Moyennant l'ajout dans ESTHER d'un module pour décrire cet effet, l'accord avec l'expérience est remarquable (figure 1a) [4]. L'analyse des propriétés optiques de la surface d'aluminium, également mesurées par notre dispositif, apporte des informations supplémentaires sur le matériau après son excitation, comme ses densités électronique et massique. Ceci nous a permis de confirmer la validité de la simulation ESTHER sur plusieurs observables (figure 1b) [4], et de décrire le scénario de la relaxation de l'énergie dans cette expérience: le couplage électron-ion élevé entraîne la liquéfaction de l'aluminium à la densité du solide,

en moins de 1 ps, sur une profondeur de plusieurs dizaines de nanomètres, tandis que la relaxation de la pression se traduit par la propagation d'une onde de raréfaction à partir de la surface de la cible (figure 2) [4].

Ce travail nous a donc permis de réaliser et de qualifier un «VISAR femtoseconde», adapté à l'observation du mouvement des surfaces sur des échelles de temps extrêmement brèves et qui sera utilisé pour observer des transitions de phases hors équilibre dans le contexte de l'étude de la matière dense et tiède, et de l'endommagement par rayonnement.

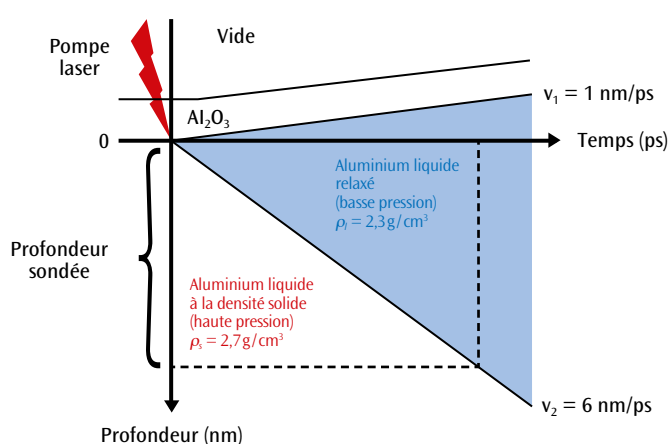


Figure 2. Schéma de la propagation de l'onde de raréfaction. Par conservation de la masse, $\rho_l(v_1 + v_2) = \rho_s v_2$.

Références

- [1] P. M. CELLIERS, D. K. BRADLEY, G. W. COLLINS, D. G. HICKS, T. R. BOEHLY, W. J. ARMSTRONG, "Line-imaging velocimeter for shock diagnostics at the OMEGA laser facility", *Rev. Sci. Instr.*, **75**, p. 4916-4929 (2004).
- [2] J. P. GEINDRE, P. AUDEBERT, A. ROUSSE, F. FALLIES, J. C. GAUTHIER, A. MYSYROWICZ, A. D. SANTOS, G. HAMONIAUX, A. ANTONETTI, "Frequency-domain interferometer for measuring the phase and amplitude of a femtosecond pulse probing a laser-produced plasma", *Opt. Lett.*, **19**, p. 1997-1999 (1994).
- [3] F. DENEUVILLE, B. CHIMIER, D. DESCAMPS, F. DORCHIES, S. HULIN, S. PETIT, O. PEYRUSSE, J. J. SANTOS, C. FOURMENT, "Sub-picosecond and nanometer scale dynamics of aluminum target surface heated by ultrashort laser pulse", *Appl. Phys. Lett.*, **102**, 194104 (2013).
- [4] C. FOURMENT, F. DENEUVILLE, B. CHIMIER, D. DESCAMPS, F. DORCHIES, S. HULIN, S. PETIT, O. PEYRUSSE, J. J. SANTOS, "An interferometric diagnostic for the experimental study of dynamics of solids exposed to intense and ultrashort radiation", *SPIE Conf. Series*, **8777** (2013).
- [5] J.-P. COLOMBIER, P. COMBIS, F. BONNEAU, R. LE HARZIC, E. AUDOUARD, "Hydrodynamic simulations of metal ablation by femtosecond laser irradiation", *Phys. Rev. B*, **71**, 165406 (2005).