

DES NANOCAVITÉS CRÉÉES PAR LASER

L. HALLO*, **, A. BOURGEADE*, V. T. TIKHONCHUK**, P. NICOLAÏ*, **
 * CEA -Cesta, ** CELIA - UMR 5107 - Université Bordeaux 1 / CNRS / CEA

Dans la gamme de longueur d'onde 800 nm – 10,6 μm les matériaux diélectriques sont généralement transparents pour un rayonnement laser dont l'énergie n'excède pas quelques joules/cm². Au-delà de ce seuil, des phénomènes d'interaction entre le rayonnement laser et le diélectrique peuvent apparaître. Un de ces phénomènes, appelé "claquage", peut modifier la structure du diélectrique en créant au sein du matériau des inhomogénéités structurales. L'origine de ce phénomène est due à l'ionisation partielle du matériau, créant localement un plasma qui devient absorbant, et provoque un échauffement violent et une dilatation. Dans les cas extrêmes, des microfissures peuvent apparaître dans le matériau, mais, en général, ce sont des cavités qui sont produites par l'expansion du plasma au sein même du matériau.

Pour éviter l'apparition de ces phénomènes, ou au contraire les utiliser pour façonner le matériau en vue d'applications, il est nécessaire de comprendre les mécanismes qui vont produire une absorption locale dans un diélectrique, et éventuellement se poursuivre par une micro explosion. En effet, au delà des problèmes d'endommagement, toute une catégorie d'applications est envisageable. Nous pouvons, par exemple, utiliser ce phénomène pour créer des nanocavités de taille contrôlée dans des diélectriques. Une de ses applications pourrait être le stockage à haute densité d'informations.

Nous présentons un modèle physique et sa validation sur des résultats expérimentaux. Les applications d'un tel modèle sont nombreuses, nous en décrivons quelques unes.



L'interaction d'une impulsion laser ultracourte (*qq centaines de femtosecondes*) avec un diélectrique transparent est un domaine d'intérêt pour le traitement des matériaux. Par rapport aux métaux, où l'interaction laser-matière est localisée dans une couche surfacique étroite, les diélectriques permettent de déposer de l'énergie à l'intérieur même du matériau. Les expériences récentes [1], [2] montrent qu'il est possible de focaliser l'impulsion laser dans une zone dont la dimension est de quelques dixièmes de la longueur d'onde du laser.

Nous présentons un modèle théorique et sa réalisation numérique [3] afin de décrire la formation d'une cavité dans un diélectrique transparent, à l'aide de la focalisation intense d'une impulsion laser ultra-courte. La physique mise en jeu est complexe, mais le processus peut se décomposer en deux étapes. La première consiste

à décrire la focalisation puis la diffraction de l'impulsion laser. La deuxième étudie les conséquences hydrodynamiques du dépôt d'énergie réalisé.

La résolution des équations de *Maxwell* est nécessaire car la zone de focalisation est plus petite que la longueur d'onde. Le système d'équations est couplé, par l'intermédiaire du courant, à des équations décrivant l'évolution locale des électrons. L'originalité de notre approche est de coupler également l'ionisation multiphotonique instantanée aux équations de *Maxwell* bidimensionnelles. Le système différentiel résultant est "raide" car le courant multiphotonique varie comme la puissance onzième du champ électrique pour une ionisation à six photons. Le calcul fournit le dépôt d'énergie consécutif au passage de l'impulsion laser dans le matériau, et le bilan énergétique complet qui donne la réflexion et la transmission de l'impulsion.

Le dépôt d'énergie produit à la fois une onde de choc divergente et une onde de détente convergente. La focalisation de l'onde de détente au centre de la zone de dépôt est à l'origine de la formation de la cavité, puisqu'elle produit une onde divergente qui "creuse" la matière sur son passage. Cette expansion au sein du matériau solide a une durée de vie limitée car elle doit surmonter les forces de cohésion de la matière : après quelques centaines de picosecondes, les pressions dans la cavité et dans le solide s'équilibrent, ce qui stoppe le processus d'expansion. Ce processus, typiquement hydrodynamique, est décrit par le code CHIC.

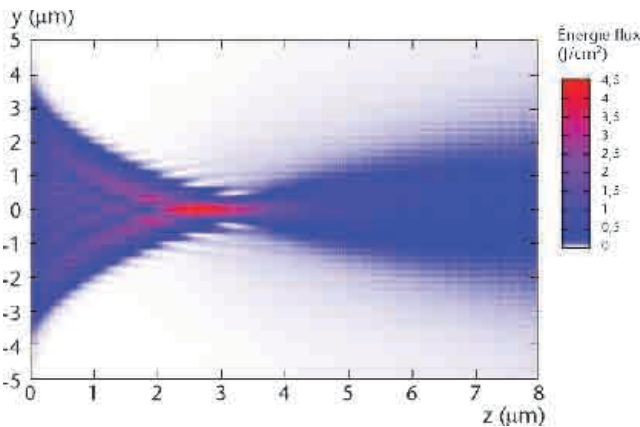


Figure 1 Flux d'énergie (J/cm^2) pour l'intensité laser de $420 \text{ TW}/cm^2$. La zone d'absorption qui permettra de former la cavité est centrée en $z = 3 \mu\text{m}$.

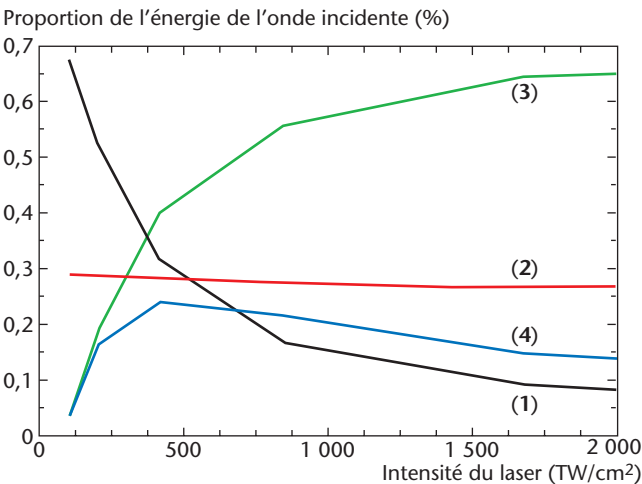


Figure 2 Contributions au bilan d'énergie en fonction de l'intensité du laser (en pourcentages) après irradiation d'une cible de silice.

(1) Énergie transmise dans le matériau ; (2) énergie réfléchie ; (3) énergie absorbée dans tout le matériau ; (4) énergie effectivement absorbée dans le volume focal. Sur cette courbe, nous voyons que l'intensité laser optimale pour la formation d'une cavité est de $450 \text{ TW}/cm^2$. Pour des intensités inférieures à $100 \text{ TW}/cm^2$, la formation de la cavité est réversible. Pour des intensités supérieures à $1200 \text{ TW}/cm^2$, le dépôt d'énergie se fait de la surface de la cible jusqu'au volume focal, l'ablation est totale, et il n'est plus possible d'identifier de cavités.

L'onde de détente initie une cavité

La formation de nanocavités dans les diélectriques fait partie des applications potentielles de ce modèle. Le faisceau laser est concentré dans le matériau avec une ouverture de 110 degrés, ce qui produit l'ionisation partielle du diélectrique, et l'absorption d'une partie de l'énergie du laser. Trois régions peuvent être distinguées dans le diélectrique comme le montre la figure 1 pour une intensité maximale du laser de $420 \text{ TW}/cm^2$. Les trois régions sont la zone de focalisation, la zone d'absorption, et la zone de diffraction. La largeur de la zone de focalisation est petite devant la taille du faisceau (moins d'un micromètre), et la longueur vaut quelques micromètres. Le dépôt d'énergie a donc une forme de cigare (figure 1). Les simulations ont été réalisées pour différentes intensités du laser, et nous avons étudié le bilan énergétique détaillé entre l'énergie absorbée, l'énergie transmise et l'énergie réfléchie (figure 2). Le maximum d'énergie absorbée se situe aux environs de $450 \text{ TW}/cm^2$. Le coefficient d'absorption est de 25 à 30 %.

Au voisinage de ce maximum, l'onde laser est absorbée au sein du matériau dans un volume inférieur au μm^3 , produisant des pressions et des températures très importantes. Par exemple, dans la silice, notre modèle prévoit des températures de l'ordre de 10 eV, une vitesse de montée en température de 10^{18} K/s , des pressions de plusieurs TPa pour une énergie laser déposée de 100 nJ. La séquence des ondes de pression produites dans le matériau est présentée sur la figure 3, à l'instant initial et à trois instants successifs. Nous distinguons clairement la détente qui se forme et repart vers l'extérieur du domaine. L'onde de choc divergente devient très rapidement une onde de choc faible, puis une onde acoustique.

Cette interprétation est validée par l'analyse *post-mortem* des cristaux au microscope électronique [1]. Elle révèle, outre une cavité sub-micrométrique, une zone de cristal amorphe, signature de l'onde de choc divergente. Le diamètre de la zone amorphe correspond à la transition de l'onde de choc en onde acoustique. Nous devons insister ici sur l'absence de dommages en dehors de la cavité formée, lorsque nous nous plaçons dans la zone d'absorption maximale.

Ces nanocavités créées par laser ont de nombreuses applications

Les applications de notre modèle sont nombreuses. Elles vont de la réalisation de cavités calibrées en perspective du stockage d'informations à haute densité, aux problèmes d'ablation chirurgicale de haute précision, en passant par l'étude de l'endommagement d'optiques, polluées ou non par des débris, au voisinage du seuil de claquage.

Références

[1] E. G. GAMALY, S. JUODKAZIS, K. NISHIMURA, H. MISAWA, B. LUTHER-DAVIES, L. HALLO, P. NICOLAÏ, V. T. TIKONCHUK, "Laser-matter interaction in a bulk of a transparent solid: confined micro-explosion and void formation", *Phys. Rev. B*, **73**, p. 214101 (2006).

[2] S. JUODKAZIS, K. NISHIMURA, S. TANAKA, H. MISAWA, E. G. GAMALY, B. LUTHER-DAVIES, L. HALLO, P. NICOLAÏ, V. T. TIKHONCHUK, "Laser induced micro-explosion confined in a bulk of a sapphire crystal: formation of a non-void", *Phys. Rev. Lett.*, **96**, p. 166101 (2006).

[3] L. HALLO, A. BOURGEADE, V. T. TIKHONCHUK, E. G. GAMALY, J. BREIL, soumis à *Phys. Rev. B* (2006).

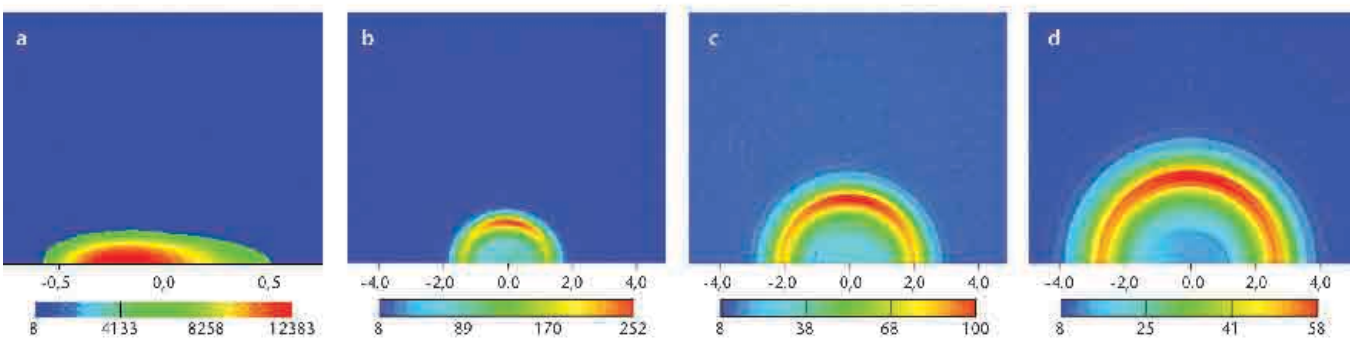


Figure 3
Séquence des ondes de pression produites dans le matériau, à quatre instants successifs.

Les isovaleurs (a) ($t = 0$ ns) représentent le champ de pression dans la silice (en 10^9 dyne/cm²) obtenu par résolution couplée des équations de Maxwell à un modèle d'ionisation, pour une intensité laser de 500 TW/cm². Le champ d'énergie interne résultant est une condition initiale du calcul d'expansion hydrodynamique.

Les isovaleurs (b) ($t = 0,2$ ns) représentent le champ de pression. L'onde de choc divergente est en $r = 1,8$ μ m, la cavité a commencé à se former. Les isovaleurs (c) ($t = 0,4$ ns) montrent que le dépôt d'énergie, qui avait la forme d'un cigare, a produit une onde de choc, et une cavité de forme quasiment sphérique. L'onde de choc divergente, en $r = 3$ μ m, devient une onde acoustique.

Les isovaleurs (d) ($t = 0,6$ ns) montrent que le gradient de pression dans le matériau s'atténue. C'est une phase de stagnation de l'onde d'expansion, qui produit la cavité finale.