

## SUCCÈS DES PREMIÈRES EXPÉRIENCES OUVERTES SUR LA LIL

G. SCHURTZ

CELIA - UMR 5107 - Université de Bordeaux I / CNRS / CEA

**L**a Ligne d'Intégration Laser (LIL) a produit, en décembre 2005, une série de tirs de puissance destinés à une campagne d'expérience de physique des plasmas. Il s'agit en fait de la première campagne d'expériences "ouvertes", c'est-à-dire réalisées pour les besoins de la recherche académique.

L'expérience, proposée par le CELIA suite à un appel d'offre de l'Institut des Lasers et Plasmas, a été préparée et conduite par une équipe réunissant des physiciens du CELIA, de l'École Polytechnique, de la Direction des sciences de la matière du CEA, et du CEA - DAM. Elle avait pour but de mesurer la vitesse de l'onde thermique induite par l'éclairement laser dans une cible solide, dans des conditions comparables à celles qui règneront dans les cibles de fusion par confinement inertiel qui seront expérimentées sur le Laser Mégajoule (LMJ) [1].

### La conduction thermique électronique et sa modélisation

Les codes de simulation numériques sont des outils indispensables pour interpréter les expériences réalisées auprès des lasers. Lorsqu'ils sont utilisés pour le dimensionnement de grandes installations, comme le LMJ, ils doivent aussi être prédictifs, et leur validation revêt une grande importance. L'implosion d'une cible de Fusion par Confinement Inertiel (FCI) repose sur la conversion en énergie mécanique de l'énergie laser. Un agent essentiel de cette conversion est la conduction thermique électronique. Sa modélisation théorique constitue donc un point clé de la compréhension et du dimensionnement des cibles.

La théorie de *Spitzer* et *Harm* décrit, en principe, convenablement la conduction thermique dans un plasma créé par laser. Néanmoins, la restitution numérique des expériences démontre que le flux de *Spitzer* surestime largement le flux réel et il est d'usage, dans les codes de simulation, de le limiter, au moyen d'un coefficient ajustable. Le recours à cette limitation *ad-hoc* affaiblit considérablement le caractère prédictif des codes de simulation, et il paraît important de s'en affranchir, ou, pour le moins, de le justifier par la théorie.

Au moins deux mécanismes expliquent cette apparente inhibition du flux de chaleur :

- en présence des forts gradients induits par l'éclairement laser, l'hypothèse d'équilibre thermodynamique local sur laquelle repose la théorie de *Spitzer* est remise en cause : le flux de chaleur est délocalisé. Il est, dans ce cas, sensiblement réduit.
- les estimations théoriques indiquent que des champs magnétiques intenses sont auto-générés par le plasma dès que l'écoulement n'est plus monodimensionnel. Les électrons, contraints à parcourir des spirales autour des lignes de champ, transportent mal la chaleur, et la conductivité thermique est fortement réduite. Il apparaît un flux de chaleur dans la direction perpendiculaire au gradient de température. C'est l'effet *Righi Leduc*.

Récemment, les physiciens du CELIA ont développé et introduit dans le code CHIC un modèle du flux de chaleur qui prend en compte ces deux effets [2], [3]. C'est la volonté de valider expérimentalement ce nouvel outil théorique qui a conduit à définir l'expérience de décembre 2005.

### L'expérience

Le code CHIC est utilisé pour le dimensionnement de cibles de FCI, c'est pourquoi il était important de réaliser l'expérience dans des conditions proches de celles qui seront rencontrées sur le LMJ : longueur d'impulsion de quelques ns, intensités comprises entre  $5 \cdot 10^{14}$  W/cm<sup>2</sup> et  $2 \cdot 10^{15}$  W/cm<sup>2</sup>, tache focale lissée. La LIL, prototype du LMJ, était donc l'instrument idéal.

Le principe de l'expérience consiste à caractériser la progression de l'onde thermique électronique dans un disque de matière plastique, matériau figurant l'ablateur de la cible à gain. Dans ce but, nous insérons dans la cible deux feuilles très minces de matériaux de numéros atomiques voisins, dont le rayonnement caractéristique signale l'arrivée de l'onde thermique (figure 2). Le choix s'est porté sur le couple vanadium-titane dont les raies héliumoides, produites à 5 200 eV et à 4 800 eV, sont proches et aisément identifiables. Le temps qui sépare l'émission des deux marqueurs permet de remonter à la vitesse de l'onde thermique. Elle est ensuite comparée aux prédictions théoriques.

Le diagnostic principal était constitué d'un cristal de carbone, pour collecter et disperser spectralement le rayonnement X issu de la cible, d'une photocathode, et d'une caméra à balayage de fente. Ce dispositif, imaginé et mis au point par les équipes du CEA - DAM, mesure, avec une résolution temporelle d'environ 50 ps, le spectre issu de la cible. La figure 2b montre une image typique produite par ce diagnostic.

La figure 1 présente les résultats de 3 des 7 tirs réalisés au cours de la seconde semaine de décembre 2005, obtenus pour la même cible, mais pour des énergies lasers différentes. Comme l'onde thermique est d'autant plus rapide que le plasma est plus chaud, l'intervalle temporel des deux émissions décroît avec l'énergie E

de l'impulsion. Une première estimation théorique repose sur le modèle stationnaire d'ablation par laser [4]. Il dit que le taux de masse ablatée varie comme l'intensité à la puissance 1/3, ce qui indique que le temps mis par l'onde thermique décroît comme  $E^{-1/3}$ . L'examen de la figure 1 indique que l'expérience vérifie assez fidèlement cette loi d'échelle.

### Accord théorie-expérience ?

Le modèle théorique qui décrit l'évolution à l'échelle de plusieurs nanosecondes d'un plasma créé par laser est un modèle fluide, qui rend compte de la conservation de la masse, de la quantité de mouvement, et de l'énergie du plasma. Les équations correspondantes sont résolues conjointement avec celles qui décrivent le transport d'énergie par conduction thermique, par rayonnement X, ainsi que la propagation et l'absorption de la lumière laser. C'est cet ensemble d'équations aux dérivées partielles qui est programmé, en deux dimensions d'espace, dans le code de simulation CHIC. Le code est agrémenté de logiciels de post-traitement des données qui simulent les diagnostics. Les résultats expérimentaux obtenus sont, aux trois énergies, correctement reproduits au moyen de simulations bidimensionnelles, mais à condition de limiter le flux de chaleur, et, surtout, de changer de limiteur quand l'intensité change !

À partir de là, il était tentant d'utiliser le modèle de conduction non local programmé dans CHIC, ce qui a été fait pour la simulation du tir à énergie médiane de 7 kJ. Dans ce cas, nous constatons avec surprise que ce modèle prédit un temps de transit plus court encore que le flux de Spitzer non limité, alors qu'il prédit une réduction sensible du flux en monodimensionnel. Ceci est dû au fait que le flux non local inhibe surtout le flux transverse et réduit fortement les pertes latérales.

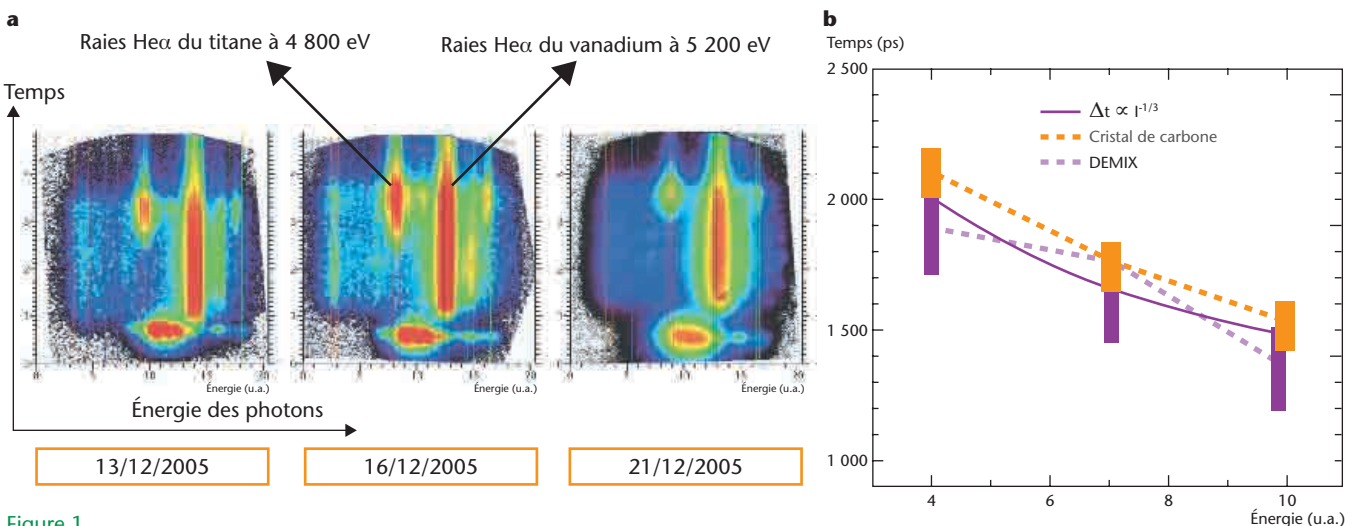


Figure 1 Images obtenues lors de l'expérience au moyen de cibles identiques, pour trois énergies lasers. La dispersion spectrale et le balayage temporel fournissent l'émission radiative de la cible dans le plan (énergie, temps) (a). L'analyse de ces images fournit les décalages temporels (en orange sur la figure 1b). Cette mesure est cohérente avec celles obtenues par le diagnostic DEMIX, représentées en violet. Un modèle analytique d'ablation prédit que le taux de masse ablaté varie comme l'intensité laser à la puissance 1/3 (trait plein sur la figure 1b).

Ce point avait déjà été observé dans le cadre de simulations cinétiques [5]. La chaleur demeure confinée le long de l'axe de symétrie de la cible, favorisant une pénétration rapide. Les effets bidimensionnels sont donc ici déterminants. Or, un effet bidimensionnel important est la présence de champs magnétiques auto générés. En géométrie axisymétrique ( $rz$ ), les lignes de champ sont des cercles d'axe  $zz'$ . Dans la géométrie de l'expérience,  $B_\theta$  est négatif, donc l'effet *Righi Leduc* provoque une rotation rétrograde du flux de chaleur. Le flux, orienté vers l'intérieur de la cible dans le cas de *Spitzer*, comporte à présent une composante latérale. La combinaison des deux effets magnétiques, inhibition du flux longitudinal et apparition du flux transverse, augmente sensiblement le temps de parcours de l'onde thermique relativement à *Spitzer* (figure 2). Faut-il pour autant exclure la présence d'effets non locaux ? Un calcul complet, incluant délocalisation et champs magnétiques prouve le contraire (figure 2). Les effets non locaux, qui réduisent la condition latérale, modèrent aussi l'effet *Righi Leduc*. Le décalage temporel d'émission des deux traceurs est alors bien restitué par ce modèle.

**Conclusion**

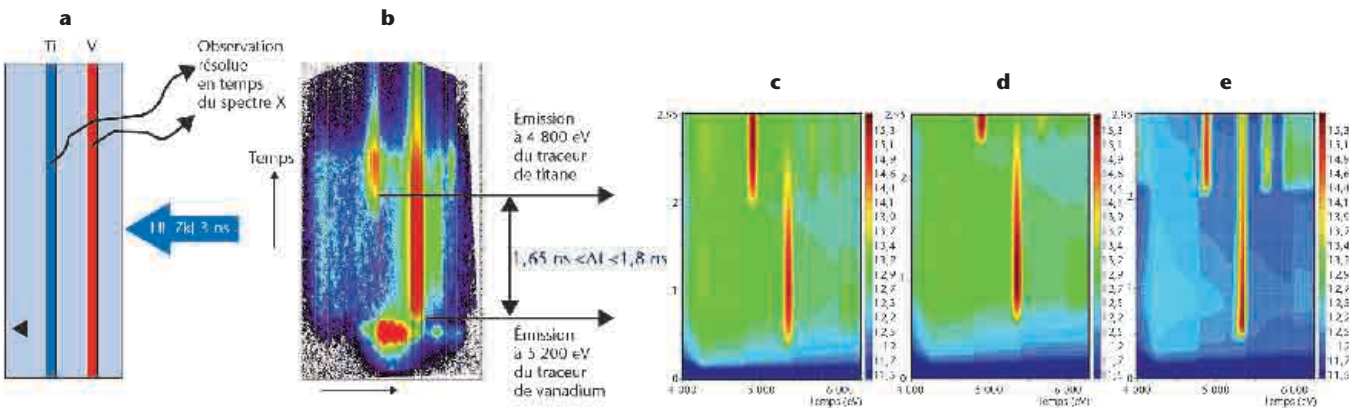
L'expérience de flux de chaleur sur la LIL a été l'occasion de valider non seulement un code de calcul, mais aussi la mise en œuvre pratique, au quotidien, de l'ouverture des installations lasers du CEA - DAM. Elle doit être considérée comme un succès, par l'abondance et la qualité des résultats expérimentaux obtenus, et par son apport à la modélisation théorique des plasmas de fusion.

Elle est également un succès à porter au crédit d'une collaboration efficace entre les unités du CEA - DAM et des laboratoires extérieurs, dans le cadre d'une grande installation. Elle a bénéficié du soutien de l'Institut des Lasers et Plasmas, mais aussi d'un fort investissement des équipes du CEA - DAM - Île-de-France pour la conception et la mise au point de l'expérience, et celles du CEA -Cesta pour sa réalisation.

L'interprétation de l'expérience suggère la création de champs magnétiques intenses, qu'il est très difficile de mesurer directement. Une telle mesure sera possible au moyen de la future installation PETAL, qui utilisera simultanément les faisceaux de la LIL et un faisceau de très haute intensité, par le procédé de radioprotonographie.

**Références**

[1] G. SCHURTZ, S. GARY, S. HULIN, J.-C. GAUTHIER, C. FOURMENT, "Revisiting Non Local Energy Transport in Inertial Fusion Conditions", *Phys. Rev. Lett.*, **98**, p. 095002 (2007).  
 [2] G. SCHURTZ, P. NICOLAÏ, M. BUSQUET, "A nonlocal electron conduction model for multidimensional radiation hydrodynamics codes", *Phys. Plasmas*, **7**, p. 4238 (2000).  
 [3] P. NICOLAÏ, J.-L. FEUGEAS, G. SCHURTZ, "A practical nonlocal model for heat transport in magnetized laser plasmas", *Phys. of Plasmas*, **13**, p. 32701 (2006).  
 [4] R. DAUTRAY, J.-P. WATTEAU, "La fusion inertielle par laser", Ed Eyrolles (1993).  
 [5] E. EPPERLEIN, G. J. RICKARD, A. BELL, "Two dimensional non local electron transport in laser produced plasmas", *Phys. Rev. Lett*, **61**, p. 2453 (1988).



**Figure 2** Mesures des émissions successives de deux traceurs métalliques minces insérés dans une cible plane de matière plastique (a). La durée qui sépare l'émission des deux traceurs donne la vitesse de l'onde thermique (b). (c) simulation avec le modèle de conduction de *Spitzer* et *Harm* : le décalage temporel obtenu est de 1,5 ns environ, non compatible avec l'observation (b) ; (d) simulation avec un modèle de génération et de transport de champs magnétiques, et le modèle de conduction de *Braginskii*. Le retard à l'émission du second traceur (1,85 ns) est en borne haute de la barre d'erreur. (e) prise en compte couplée des champs magnétiques et des effets non locaux. Elle fournit un décalage de 1,75 ns, en meilleur accord avec la mesure.