

Institut Lasers et Plasmas

**2005 – 2014 : 10 ANS DE
CAMPAGNE D'OUVERTURE LIL / ILP**

**2005 – 2014: 10 YEARS OF
LIL / ILP OPEN CAMPAIGN**



Éditorial / Executive summary

C e recueil est dédié à tous les scientifiques qui ont utilisé la LIL pour des expériences de physique ouvertes.

La LIL a tout d'abord été conçue et réalisée par le CEA comme une ligne prototype du Laser Mégajoule. Ensuite, elle a été organisée en infrastructure expérimentale permettant au CEA d'acquérir de nombreuses données utiles pour ses programmes. En parallèle, la Défense a souhaité que cette installation soit ouverte à la communauté académique. Avec une énergie de 30 kJ délivrée dans l'ultraviolet, la LIL a été, durant toute sa vie, le plus grand laser européen et donc une installation sans égale pour les physiciens.

Le CEA a confié à l'Institut lasers et plasmas (ILP) la mission d'organiser l'ouverture et l'accueil des scientifiques. Entre son ouverture à la communauté académique en 2005 et la fermeture en 2014, la LIL a fourni environ 80 séquences d'expériences laser aux scientifiques de l'ILP, réparties sur une demi-douzaine de thèmes scientifiques, thèmes que l'on peut classer en deux catégories, ceux traitant de la fusion par confinement inertiel pour la production d'énergie, et ceux relatifs à la planétologie et à l'astrophysique.

Dans la première catégorie, en allant de l'extérieur d'une cible vers le centre de la cible, on peut citer une étude d'interaction laser-plasma, portant sur la propagation du rayonnement laser dans le plasma créé à la surface de la cible à partir d'une mousse de faible densité, une autre sur la conduction thermique par

les électrons de l'extérieur de la cible vers l'intérieur, en particulier en présence de champs magnétiques auto-générés, et aussi une étude sur l'allumage des cibles par choc intense en fin de phase de compression.

Dans la seconde catégorie, on trouve des études de compression isentropique donnant accès aux équations d'état du quartz et du fer, c'est-à-dire à la connaissance des relations entre densité, température et pression de ces corps, dans les conditions proches de celles que l'on trouve au sein des planètes solaires ou extrasolaires, et une étude des chocs radiatifs analogues à ceux que l'on rencontre dans le milieu interstellaire.

Les premiers résultats ont été publiés dans les meilleures revues scientifiques internationales, ce qui témoigne de leur qualité et de celle de l'installation. Les autres résultats obtenus sont en cours d'analyse – le dépouillement et l'interprétation des données expérimentales demandent un travail au moins aussi important que la préparation des expériences.

De même que la LIL fut le prototype du Laser Mégajoule (LMJ), les expériences faites sur cette installation par les scientifiques de l'ILP préfigurent celles qui seront réalisées prochainement sur l'installation LMJ-PETAL par la communauté scientifique ILP élargie au niveau international. À n'en pas douter les résultats scientifiques marquants seront, là encore, au rendez-vous! ●

T his booklet is dedicated to all the scientists who have used the laser LIL for open physics experiments. First, the LIL was designed and carried out by the CEA as a prototype of the Laser Megajoule. Then, the LIL was organized in experimental infrastructure with the aim of enabling the CEA to acquire useful data for its own programs. In parallel, the Defence wished this facility to be opened to the academic community. With a 30 kJ ultraviolet energy, the LIL was the highest performance European laser during its whole life, and therefore an unique facility for physicists. The CEA tasked the Institute of Lasers and Plasmas (ILP) with organizing the opening and access of scientists. Between its opening to the academic community in 2005 and its closure in 2014, the LIL approximately provided to the ILP scientists 80 experimental sequences, that are classified in half a dozen scientific themes.

Such a classification is divided into two main categories, the first one being related to Inertial Confinement Fusion for the production of energy, and the second one linked to planetary science and astrophysics. In the first category, going from the outside towards the center of the target, one can mention a study of the laser propagation into the plasma created at the

target's surface from a low-density foam, another one focused on electronic heat conduction throughout the target especially in presence of self-generated magnetic fields, and at last a study on targets ignition by using an intense shock at the end of the compression phase.

In the second category, one can cite studies of isentropic compression giving access to the equations of state of quartz and iron, i.e. relationships between density, temperature and pressure of these materials, in conditions close to those found within the solar and extra-solar planets, as well as a study of radiative shocks similar to those in the interstellar medium.

The first results have been published in the best international scientific journals, which reflects their quality and the facility performance as well. The analysis of other results is still in progress since counting and interpretation of experimental data require a job at least as important as the preparation of experiments.

As well as the LIL was the prototype of the Laser Megajoule (LMJ), ILP scientists experiments on this facility prefigure those that will be performed on the LMJ-PETAL facility by this ILP community extended to the international level. No doubt that significant scientific results are expected! ●

2005 - 2014 : 10 ans de campagne d'ouverture sur la LIL

2005 - 2014: 10 years of LIL open academic campaign

Éditorial / Executive summary

- 1.** **Transport non local et magnétisé de l'énergie dans le cadre de la FCI / Nonlocal magnetized transport of energy in Inertial Fusion Conditions** 4
G. SCHURTZ, S. HULIN, J.-C. GAUTHIER, J. BREIL, J.-L. FEUGEAS, P.-H. MAIRE, PH. NICOLAÏ, O. PEYRUSSE, V. TIKHONCHUK, C. FOURMENT, S. GARY, F. DURUT, C. REVERDIN, G. SOULLIE, B. VILLETTE, C. CHENAIS-POPOVIC, F. THAIS
 - 2.** **Réduction de l'empreinte laser par lissage plasma / Laser imprint reduction caused by plasma smoothing** 8
C. LABAUNE, D.-T. MICHEL, S. DEPIERREUX, P.-E. MASSON-LABORDE, G. RIAZUELO, P. LOISEAU, M. CASANOVA, V. T. TIKHONCHUK, C. STENZ, P. NICOLAÏ, N. G. BORISENKO, S. HÜLLER, D. PESME
 - 3.** **L'étude des intérieurs planétaires de type terrestre : un enjeu pour les lasers intenses / Study of the Earth-like planetary interiors: a challenge for high-energy lasers** 12
M. KOENIG, N. AMADOU, A. BENUZZI-MOUNAIX, E. BRAMBRINK, T. VINCI, F. GUYOT, G. MORARD, T. DE RESSÉGUIER, S. MAZEVET, G. HÜSER
 - 4.** **Chocs radiatifs d'intérêt astrophysique / Performing radiative shocks for laboratory astrophysics** 16
C. MICHAUT, M. KOENIG, S. BOUQUET, A. CASNER, S. LAFFITE, D. RAFFESTIN, P. BARROSO, S. LE PAPE, P. DRAKE
 - 5.** **Le quartz aux conditions des cœurs d'Uranus et de Neptune / Quartz at the conditions of Uranus and Neptune's cores** 20
A. BENUZZI-MOUNAIX, T. VINCI, E. BRAMBRINK, A. RAVASIO, M. KOENIG, S. MAZEVET, S. BRYGOO, F. GUYOT, G. MORARD
 - 6.** **L'allumage par choc : schéma alternatif à la FCI ? / Shock ignition: alternative scheme for ICF ?** 24
S. BATON, M. KOENIG, D. BATANI, E. LE BEL, X. RIBEYRE, S. BRYGOO, CH. ROUSSEAU, D. RAFFESTIN
- Glossaire / Glossary** 28

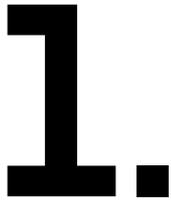


Institut lasers et plasmas (ILP) 2005-2014 : 10 ans de campagne d'ouverture sur la LIL

Image de couverture : Vue extérieure de la chambre expérimentale de la LIL / **Image de 4^e couverture** : Vue intérieure de la chambre expérimentale de la LIL équipée de diagnostics / **Directeurs de publication** : Thierry Massard & Patrick Mora / **Comité scientifique** : Dimitri Batani, Thierry Massard, Patrick Mora, Vladimir Tikhonchuk / **Rédacteur en chef** : Michel Boivineau / **Secrétariat, diffusion et abonnement** : Régis Vizet / **E-mail** : chocs@cea.fr / **Création** : EFIL - www.efil.fr / **Impression** : Gibert & Clarey, Chambray-lès-Tours / **Production et édition** : Association lasers et plasmas / **E-mail** : Patrick.Mora@cph.t.polytechnique.fr

Institute of lasers and plasmas (ILP) 2005-2014: 10 years of LIL open academic campaign

Image of front cover: External view of the LIL experimental chamber / **Image of back cover**: Internal view of the LIL experimental chamber equipped with its diagnostics / **Publishers**: Thierry Massard & Patrick Mora / **Scientific committee**: Dimitri Batani, Thierry Massard, Patrick Mora, Vladimir Tikhonchuk / **Editor in chief**: Michel Boivineau / **Assistant editorship, circulation and subscription**: Régis Vizet. / **E-mail**: chocs@cea.fr. / **Designer**: EFIL - www.efil.fr / **Printing**: Gibert & Clarey, Chambray-lès-Tours / **Production and edition**: Association lasers et plasmas / **E-mail**: Patrick.Mora@cph.t.polytechnique.fr



G. SCHURTZ, S. HULIN, J.-C. GAUTHIER, J. BREIL, J.-L. FEUGEAS, P.-H. MAIRE, PH. NICOLAÏ, O. PEYRUSSE, V. TIKHONCHUK, C. FOURMENT / CELIA, Université Bordeaux 1—CEA—CNRS, Talence
S. GARY, F. DURUT, C. REVERDIN, G. SOULLIE, B. VILLETTE / CEA — DAM Île-de-France
C. CHENAIS-POPOVICS / LULI, École polytechnique, Palaiseau
F. THAIS / CEA — DSM, Centre de Saclay

Transport non local et magnétisé de l'énergie dans le cadre de la FCI

La fusion nucléaire est une source d'énergie quasi inépuisable, présente partout dans l'Univers. Le schéma de **fusion par confinement inertielle (FCI)** par laser est actuellement étudié sur l'installation américaine **National Ignition Facility (NIF)** et le sera dans les prochaines années sur le **Laser Mégajoule (LMJ)**. Les recherches visent la maîtrise de ce processus en laboratoire pour la production de l'énergie. Dans ce schéma, un très grand nombre de faisceaux laser sont utilisés pour imploder une capsule millimétrique emplie d'un mélange de **deutérium** et **tritium**. La conversion de l'énergie laser en énergie thermique et

cinétique dépend fortement de la conduction thermique électronique. La théorie utilisée pour décrire ce processus d'échange d'énergie est celle de Spitzer et Härm (SH) [1]. Malheureusement, cette théorie ne permet pas de reproduire les expériences actuelles, et une limitation artificielle du flux doit être utilisée pour s'en approcher. Cette limitation dépend des conditions laser, de la géométrie de l'expérience voire du diagnostic simulé et retire donc, en partie, le caractère prédictif des moyens de simulation.

Deux principaux mécanismes peuvent expliquer cette limitation : de forts gradients en température

induits par l'éclairement laser et des champs magnétiques intenses auto-générés par le plasma. Dans le premier cas, l'hypothèse d'équilibre thermodynamique local, sur laquelle repose la théorie de SH, n'est plus respectée. Le flux de chaleur devient non local, provoquant une diminution de son maximum et un préchauffage en amont du front de température. Dans le second cas, les champs magnétiques induits par des écoulements multidimensionnels peuvent modifier la trajectoire des électrons porteurs du flux de chaleur. Ils réduisent ainsi le flux thermique dans une direction et le dévient dans une autre direction. Il s'agit de l'effet Righi-Leduc.

Nonlocal magnetized transport of energy in Inertial Fusion Conditions

Nuclear fusion is a virtually inexhaustible source of energy in the Universe. The scheme of **Inertial Confinement Fusion (ICF)** by laser is being investigated in the US on the **National Ignition Facility (NIF)** and will in the coming years on the **Laser Megajoule (LMJ)**. The main goal is to control this process in laboratory for the future energy production. A large number of laser beams is used to implode a millimeter-sized capsule filled with a mixture of a **deuterium** and **tritium**. The conversion efficiency of the laser energy into the

plasma kinetic and thermal energy strongly depends on the electron thermal conduction. The theory that describes the energy transfer process in plasmas has been developed by Spitzer and Härm (SH) [1]. Unfortunately, the SH theory does not reproduce the laser-plasma interaction experiments and an artificial limitation of the heat flux is used in numerical simulations. This limitation depends on the laser conditions, the geometry of the experiment or simulated diagnostic and thus strongly undermines the predictive nature

of the simulation tools.

Two main mechanisms may explain this limitation: sharp temperature gradients induced by the laser heating and the self-generated magnetic fields in plasma. In the first case, the SH assumption of a local thermodynamic equilibrium is no longer satisfied. The heat flux becomes nonlocal, which is leading to a limitation of its maximum and a plasma preheating before the temperature front. In the second case, the magnetic fields induced by plasma currents modify the electron orbits

Récemment, un modèle a été développé [2,3] pour prendre en compte ces deux mécanismes. Il a été introduit dans le code d'hydrodynamique radiative CHIC [4] et a nécessité une validation expérimentale dans les conditions de la FCI. C'est ce dernier point qui a conduit à la première expérience sur la LIL en décembre 2005.

L'idée de l'expérience a consisté en la mesure de la progression de l'onde thermique électronique dans un disque de plastique, matériau figurant l'ablateur des cibles de FCI. Les conditions proches de celles qui seront rencontrées sur le LMJ ont été réalisées. Une impulsion de la LIL lissée de 2,7 ns, avec des inten-

sités comprises entre 5×10^{14} et 2×10^{15} W/cm², a été focalisée sur une tache de 800 µm. Deux traceurs ont été implantés dans la cible (figure 1). Ces traceurs de numéros atomiques voisins émettent un rayonnement caractéristique signalant l'arrivée de

l'onde thermique. Le choix s'est porté sur le couple Vanadium - Titane dont les raies héliumoides, produites à 5,2 et 4,8 keV, sont proches et aisément identifiables. Le temps qui sépare l'émission des deux marqueurs permet alors de remonter à la vitesse

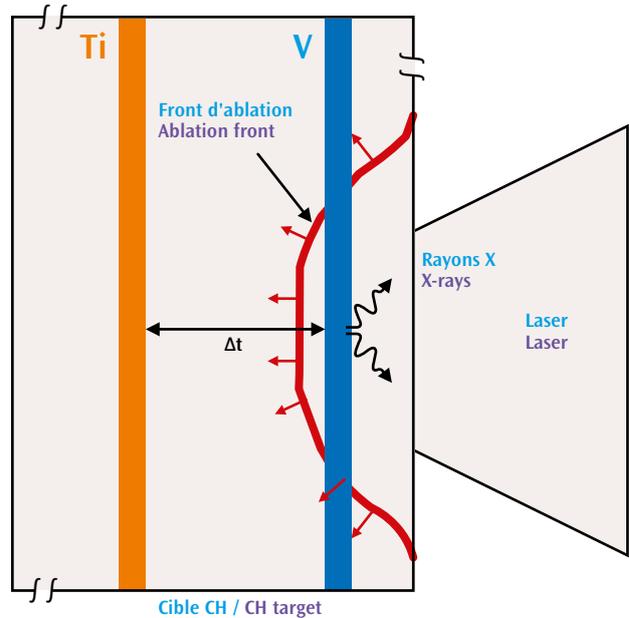


Figure 1. Principe de l'expérience : La vitesse de l'onde thermique est mesurée à partir du délai Δt entre l'émission de 2 traceurs implantés dans la cible. Principle of the experiment: The flow velocity was measured from the time delay Δt of the emission of two buried layers

and deviate or suppress the heat flux. This is known as the Right-Leduc effect. Recently, a model has been developed [2,3] that takes into account both heat flux reduction mechanisms. It was introduced in a radiation hydrodynamics code CHIC [4] and needed the experimental validation in ICF conditions. This was the subject of the first experiment on the LIL in December 2005.

The idea of the experiment was to study the propagation of the electron thermal wave in a plastic disc, the material used as an ablator in the ICF targets. The experiment was performed in the conditions close to

those that will be encountered on LMJ. A smoothed laser pulse of 2.7 ns duration with intensity ranging between 5×10^{14} and 2×10^{15} W/cm² was focused in a spot of 800 µm. The thermal wave speed was measured with two tracers implanted in the target (Figure 1). These tracers emit characteristic radiations indicating the arrival of the thermal wave. Vanadium and Titanium were chosen as tracers. Their helium-like lines, at 5.2 and 4.8 keV are close to each other and easily detectable. The time delay between the emissions of the two markers allowed inferring the speed of the thermal wave,

which was compared with theoretical predictions. The primary diagnostic was a time-resolved X-ray spectrometer based on a streak camera and a carbon HOPG crystal used as dispersive element. Figure 2a shows a typical image obtained with this diagnostic.

The hydrodynamic code CHIC was used to interpret this experience and to simulate the diagnostics. The emission spectra of both tracers are presented in Figure 2b, and the experimental and theoretical results are summarized in Table 1. Using the classical theory of SH, the experimental results can be reproduced

1.

de l'onde thermique. Elle est ensuite comparée aux prédictions théoriques. Le diagnostic principal était constitué d'un cristal de carbone HOPG, pour collecter et disperser spectralement le rayonnement X issu de la cible, d'une photocathode, et d'une **caméra à balayage de fente**. La *figure 2a* montre une image typique produite par ce diagnostic.

Le code d'hydrodynamique CHIC a été utilisé pour reproduire cette expérience et simuler les diagnostics (*figure 2b*). Les résultats expérimentaux obtenus, présentés dans le *tableau 1*, peuvent être reproduits au moyen de simulations bidimensionnelles avec le modèle SH, mais seulement à condition de limiter le flux de chaleur en fonction de l'intensité laser. Cela confirme la nécessité d'un modèle prédictif pour les codes de simulation. Le modèle de conduc-

tion non local implanté dans CHIC a donc été utilisé pour simuler le tir d'énergie médiane de 7 kJ. Ce modèle prédit cependant un temps de transit plus court encore que le flux SH non limité. Ceci est dû au fait que le flux non local inhibe surtout le flux transverse. Il réduit fortement les pertes latérales en augmentant le flux axial. Ce point avait déjà été observé dans les simulations cinétiques [5]. La chaleur demeure confinée le long de l'axe de symétrie de la cible, favorisant une pénétration rapide de l'énergie.

Les effets bidimensionnels sont donc ici déterminants ainsi que les champs magnétiques autogénérés. Dans la géométrie de l'expérience, l'effet Righi-Leduc provoque une rotation rétrograde du flux de chaleur. Le flux, orienté initialement vers l'intérieur de la cible, 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 au modèle SH. Comme on peut le voir dans le *tableau 1*, la seule prise en compte des champs magnétiques permet d'atteindre la valeur haute des barres d'erreur. Un calcul complet, incluant cette fois-ci la délocalisation et les champs magnétiques a enfin été réalisé pour les trois énergies. Les effets non locaux, qui réduisent la conduction latérale, modèrent l'effet Righi-Leduc tandis que ceux qui renforcent la conduction axiale sont réduits par les champs magnétiques. La combinaison des deux mécanismes permet de restituer au mieux le décalage temporel d'émission des deux traceurs.

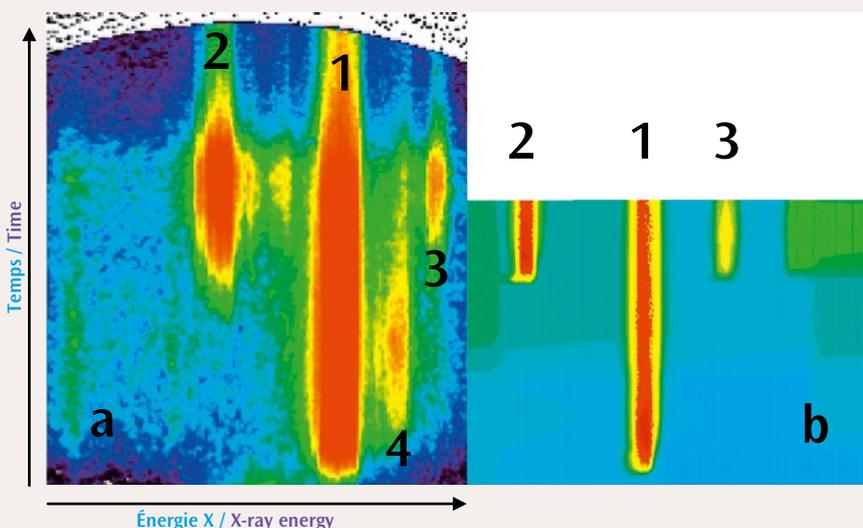


Figure 2. Spectre X mesuré (a) et simulé (b) avec le code CHIC en utilisant le modèle de SH avec le flux limité. Le laser a une énergie de 7,2 kJ. Ligne 1 : V He_α à 5204 eV, ligne 2 : Ti He_α à 4749 eV, ligne 3 : Ti He_α à 5581 eV, ligne 4 : Ly_α à 5443 eV. Measured time-resolved X-ray spectrum (a) and the CHIC simulation (b) with the flux-limited SH model. Laser energy is 7.2 kJ. Line 1: V He_α at 5204 eV, line 2: Ti He_α at 4749 eV, line 3: Ti He_α at 5581 eV, line 4: Ly_α at 5443 eV.

Énergie laser / Laser energy	4.2 kJ	7.2 kJ	10 kJ
Données du cristal HOPG / HOPG crystal data	2.1 ± 0.1	1.75 ± 0.1	1.5 ± 0.1
SH non limité / Unlimited SH	1.9	1.45	1.0
SH limité / Limited SH, $f = 0.07$	2.45	1.75	1.5
SH limité / Limited SH, $f = 0.10$	2.05	1.65	1.35
Non local / Nonlocal		1.30	
Champs magnétiques / Magnetic fields	2.0	1.85	1.55
Non local+ Champs magnétiques / Nonlocal + magnetic fields	2.15	1.75	1.5

Tableau 1. Comparaison entre théories et l'expérience pour les délais d'émission (en ns) entre les traceurs de Vanadium et de Titane.

Table 1. Comparison of theoretical estimates and experimental data for the emission delay (in ns) between the Vanadium and Titanium markers.

Depuis cette expérience, d'autres modèles non locaux ont été publiés, comme par exemple celui de la référence [6]. Cependant l'analyse récente [7] montre qu'en une ou deux dimensions le modèle [2] reste à ce jour le plus compétitif aussi bien en terme

de précision que de temps machine. Ce dernier a d'ailleurs été implémenté dans la plupart des codes de FCI comme les codes DRACO et LILAC à Rochester, HYDRA à Livermore ou encore DUED à Rome. ●

only by limiting the heat flux, and by changing the limitation factor with the laser intensity. This confirms the need for a predictive model for the simulation tools. The nonlocal heat conduction model implemented in the CHIC code has been used to simulate the median energy of 7 kJ. The model predicts, however, a time delay much shorter than measured. This is explained by the fact that the nonlocal model inhibits the transverse flow too strongly and reduces the lateral losses too much. This had already been observed in the context of kinetic simulations [5]. The heat remains confined along the axis of symmetry of the target, facilitating

a rapid propagation of the heat wave. Two-dimensional effects are thus decisive in this experiment, including the self-generated magnetic fields. In particular, the Righi-Leduc effect induces a deviation of the heat flow. A combination of both effects – inhibition of the longitudinal flux and enhancement of the transverse flux – significantly increases the travel time of the thermal wave compared to the SH model. As can be seen in Table 1, the effects of magnetic fields alone allow reaching the limit of the error bars. Complete simulations, including the non-locality and magnetic fields were finally performed for the three energies. The nonlocal effects

Références References

[1] G. SCHURTZ *et al.*, «Revisiting nonlocal energy transport in inertial fusion conditions», *Phys. Rev. Lett.*, **96**, 095001 (2007).

[2] G. SCHURTZ *et al.*, «A nonlocal electron conduction model for multidimensional radiation hydrodynamics codes», *Phys. Plasmas*, **7**, p. 4238-4249 (2000).

[3] P. NICOLAÏ *et al.*, «A practical nonlocal model for heat transport in magnetized laser plasmas», *Phys. Plasmas*, **13**, 32701 (2006).

[4] P.-H. MAIRE *et al.*, «A cell-centered Lagrangian scheme for two-dimensional compressible flow problems», *SIAM J. Sci. Comput.*, **29**, p. 1781-1824 (2007).

[5] E. EPPERLEIN *et al.*, «Two-dimensional nonlocal electron transport in laser produced plasmas», *Phys. Rev. Lett.*, **61**, p. 2453-2456 (1988).

[6] W. MANHEIMER *et al.*, «Calculations of nonlocal electron energy transport in laser produced plasmas», *Phys. Plasmas*, **19**, 056317 (2012).

[7] A. MAROCCHINO *et al.*, «Comparisons for nonlocal hydrodynamic thermal conduction models», *Phys. Plasmas*, **20**, 022703 (2013).

reduce the lateral conduction, while the magnetic fields reduce the axial conduction. A combination of these two yields the best explanation of the experiment.

Since the time of this experiment, other nonlocal models have been published, such as that of the reference [6]. However, a recent analysis [7] shows that in one or two dimensions, the model [2] remains up to date the most competitive both in terms of precision and computing time. It has also been implemented in most codes of ICF as DRACO and LILAC at Rochester, HYDRA at Livermore or DUED at Rome. ●

2.

C. LABAUNE, D.-T. MICHEL / LULI, École polytechnique, Palaiseau
S. DEPIERREUX, P.-E. MASSON-LABORDE, G. RIAZUELO, P. LOISEAU, M. CASANOVA / CEA – DAM Île-de-France
V. T. TIKHONCHUK, C. STENZ, P. NICOLAÏ / CELIA, Université Bordeaux 1–CEA–CNRS, Talence
N. G. BORISENKO / P. N. Lebedev Physical Institute, Moscow, Russia
S. HÜLLER, D. PESME / Centre de physique théorique, École polytechnique, Palaiseau

Laser imprint reduction caused by plasma smoothing

Spatial inhomogeneities in the intensity distribution of an incident laser beam can drive fast growing perturbations of the shell during the acceleration and deceleration phases of a target compression for thermonuclear fusion. Controlling **Rayleigh-Taylor instabilities** is one of the outstanding problems in **inertial confinement fusion (ICF)**. A new scheme has been proposed, based on the smoothing of a laser beam caused by its propagation through a plasma. Experiments have been designed using a low-density foam placed in front of a target irradiated with the **LIL**. They have demonstrated a reduction of the laser imprint associated with an increase of the incoherency of the transmitted beam through the foam. The interpretation of the data was carried out by means of numerical simulations to identify the mechanisms responsible of the smoothing and to study the laser light dynamics in the plasma. These experimental results validate the efficiency of laser-plasma induced smoothing to reduce the laser imprint for **direct-drive ICF** targets [1].

Laser-plasma interaction (LPI) physics governs the propagation and the coupling of laser beams in plasmas. The understanding of LPI is one of the major challenges in **ICF**. The three main impacts of LPI concern the good uniformity of the irradiation, the efficiency of laser-plasma coupling and the limitation of the number of high-energy electrons. One key parameter to control the **parametric instabilities** is the laser coherency. It can be imposed by the laser itself or, as observed in previous experiments [2], by the propagation of the beams through the

plasma. These experiments are part of a long-term program associating experimental, theoretical and numerical approaches. The 12 kJ of the **LIL** beams were used to produce a large-scale, high-temperature, plasma.

The LIL beams irradiated a target composed of a thick foil with a low density material deposited on it. The scheme of the experiment is shown in *Figure 1*. The target was placed 5 mm in front of the focal plane in order to increase the beam spot size, and to produce inhomogeneities of intensity from a few tenths to a few hundreds of microns due to a slight separation of the four beams. The shape of the focal spot was approximately a square of 1 mm side and the average intensity was $\sim 4 \times 10^{14}$ W/cm². Shots used alternatively thick copper foils (10 μ m thickness), foams, and composed targets (foam + foil). The foams were low-density polymer C₁₅H₂₀O₆ with small (~ 1 μ m) cell structures.

The plasma and interaction characteristics were calculated with the code CHIC [3], such as the temporal evolution of the transmission through the foam, shown in *Figure 2a* for the experiment and *Figure 2b* for the simulation. The interaction parameters were chosen so that the ionization wave in the foam was supersonic [4], thus avoiding the creation of pressure perturbations at the ablation surface. The velocity of the ionization front was deduced from images of the time-resolved side X-ray emission of the foam along the propagation axis, of which an example is shown in *Figure 3a*. The comparison of this velocity with the ion acoustic velocity (c_s) is plotted in *Figure 3b*, showing that the front is supersonic for the full duration of ionization.

Five diagnostics, in the optical and X-ray domains, provided complementary information on the laser propagation through the foam.

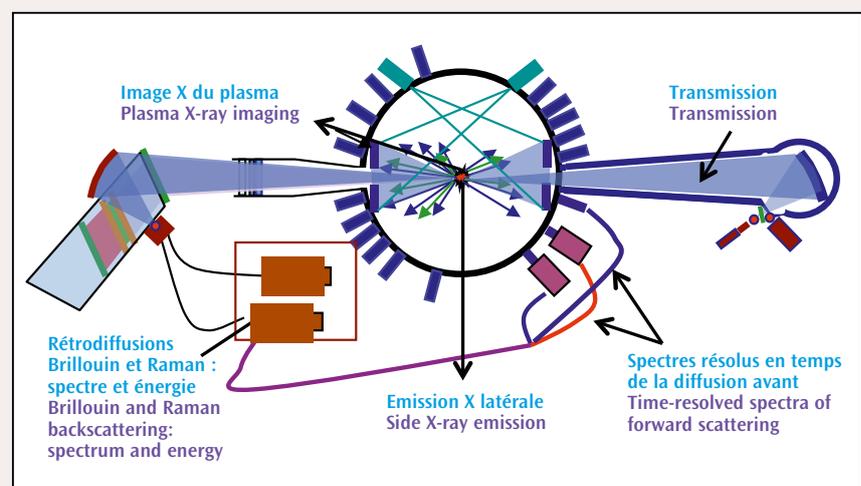


Figure 1. Schéma de l'expérience de lissage plasma avec les principaux diagnostics. Scheme of the plasma smoothing experiment with the main diagnostics.

Réduction de l'empreinte laser par lissage plasma

Les fluctuations spatiales d'intensité d'un faisceau laser incident peuvent servir de germe aux **instabilités hydrodynamiques** lors de la compression de la cible. Le contrôle de ces instabilités est essentiel pour atteindre des taux de compression élevés et l'**ignition** d'une cible de **fusion par confinement inertiel**. Le but des expériences décrites dans cet article est d'étudier un nouveau schéma de lissage de ces fluctuations par la propagation du faisceau laser dans un plasma. Les expériences reposent sur l'utilisation de cibles composées d'une mousse de faible densité déposée sur une feuille de cuivre irradiées par la LIL. La réduction de l'empreinte laser imposée au faisceau a été observée et associée à l'augmentation de l'incohérence du faisceau lors de la traversée de la mousse. Des simulations numériques ont permis d'identifier les processus physiques responsables du lissage et d'observer l'évolution de la distribution d'intensité laser dans le plasma. Ces résultats ont permis de valider l'intérêt de cette méthode pour réduire les problèmes d'empreinte laser [1].

La propagation et le couplage d'un faisceau laser avec un plasma reposent sur la physique de l'interaction laser-plasma. Cette physique représente l'un des défis majeurs de la **fusion par confinement inertiel**, les objectifs étant d'obtenir une bonne uniformité de l'irradiation, un couplage laser-plasma efficace et peu d'électrons rapides. L'un des paramètres clés pour le contrôle des **instabilités paramétriques** est la cohérence du faisceau laser. Celle-ci peut être imposée par le laser lui-même ou, comme cela a été observé dans des expériences précédentes [2], par sa propagation dans le plasma de couronne. Les expériences décrites ici s'inscrivent dans un programme à long terme couplant des études expérimentales, théoriques et numé-

riques. Les 12 kJ de la LIL ont permis de produire des plasmas plus chauds et de plus grandes dimensions que ceux des études précédentes.

Le quadruplet de la LIL a irradié les cibles composées de mousses de différentes longueurs (500 μm -1mm) et densités (7-10 mg/cc) déposées sur une feuille de cuivre de 10 μm d'épaisseur. Le schéma des expériences est présenté sur la figure 1. La cible est placée 5 mm en avant du plan focal pour augmenter le diamètre de la tache focale et pour produire des inhomogénéités de quelques dizaines à quelques centaines de microns liées à la séparation des quatre faisceaux. La tache focale est approximativement carrée et l'intensité moyenne est de $\sim 4 \times 10^{14} \text{ W/cm}^2$. Les résultats reposent sur la comparaison des tirs sur les feuilles de cuivre, sur les

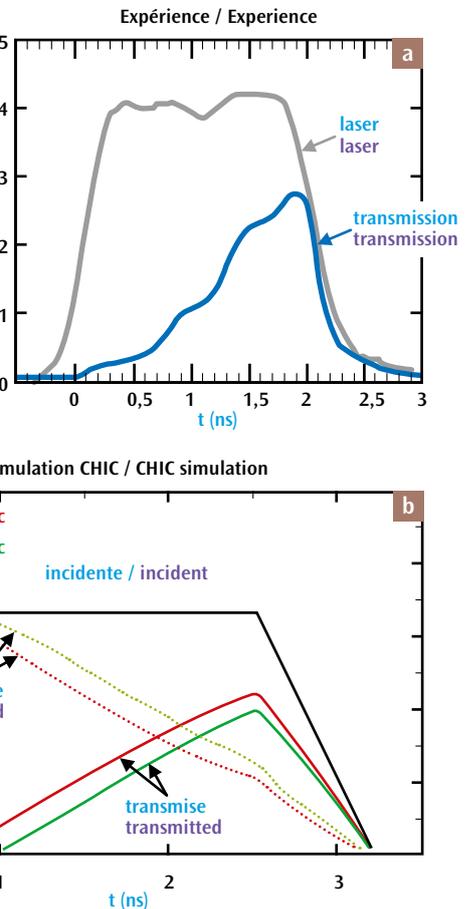


Figure 2. Évolution temporelle de la transmission à travers une mousse : expérience (a) et simulation numérique avec le code CHIC (b). Temporal evolution of the transmitted light through the foam: experiment (a) and CHIC simulation (b).

mousses et sur les cibles composées. Les mousses sont des polymères $\text{C}_{15}\text{H}_{20}\text{O}_6$ avec des structures micro-niques.

Les caractéristiques du plasma et de l'interaction ont été calculées avec le code CHIC [3], telle l'évolution temporelle de la transmission à travers la mousse présentée sur la figure 2a pour l'expérience et la figure 2b pour la simulation. Les paramètres de l'interaction ont été choisis pour que l'onde d'ionisation soit supersonique [4], ce qui permet d'éviter les perturbations de la pression sur la surface d'ablation. La vitesse du front d'ionisation a été déduite des images de l'émission X de la mousse résolue en temps le long de la direction de propagation (figure 3a). Le front est supersonique pour toute la durée de l'ionisation (figure 3b).

2.

The imprint reduction was observed by comparing the X-ray framing images (integrated over 200 ps) of the emission of the copper foil emission when it was directly irradiated by the LIL laser or when it was placed behind a 500 μm of 10 mg/cc foam [1]. With no foam, at the beginning of the laser pulse, we observed large intensity fluctuations with the same spatial scale as in the focal spot distribution in vacuum. With the foam, at the equivalent time, i.e. when the laser beam reaches the foil, the copper foil emission is much smoother than in the previous case. The inhomogeneities of size of the order of 50 μm have been removed and the amplitudes of the small-scale fluctuations have been strongly reduced.

The smoothing of the beam is explained by the plasma-induced incoherency [5] leading to the broadening of the angular diagram and the spectra of the transmitted light. Examples of spectra of the transmitted light at 12° and 20° from the beam axis are shown in Figure 4. In both cases we observe a spectral shift toward long wavelengths, greater at 20° than at 12°, which is well reproduced by the HERA simulations [6].

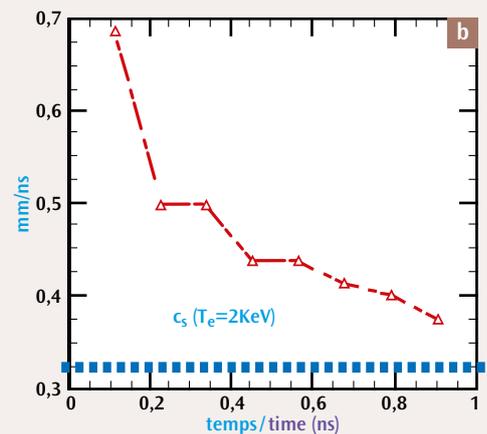
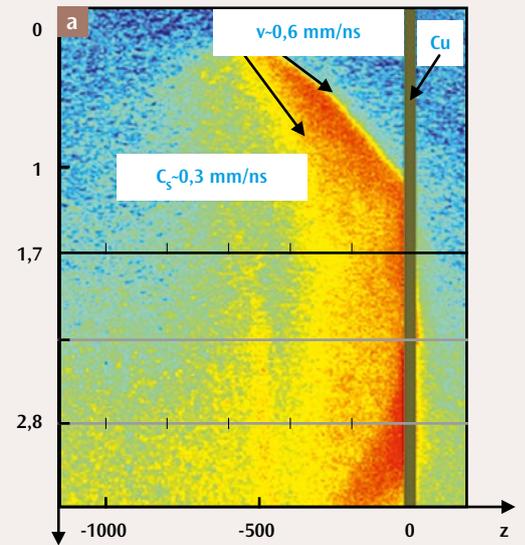
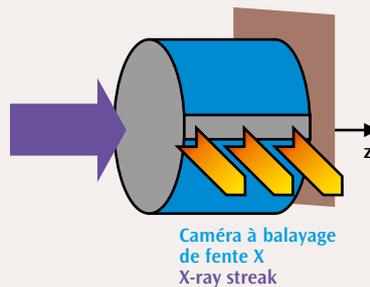
Three-dimensional simulations were conducted with the laser-plasma interaction code PARAX [7], using the CHIC plasma parameters. They showed that the beam smoothing was due to multiple scattering on laser-induced density perturbations due to **forward stimulated Brillouin scattering (FSBS)** and speckle self-focusing [8]. The reduction of the spatial coherency of the laser light allows the smoothing of structures with wavelengths larger than a few microns while the broadening of

the temporal spectrum provides a homogeneous fluence of the transmitted light. The evolution of the incident laser intensity in the plasma calculated with the Harmony2D code [9] showed the reduction of the local intensity fluctuations.

The foam plasma provides laser beam smoothing in front of the

absorption zone and a homogeneous ablation pressure for a time long enough for creating a thermal conduction zone inside the target. The following experiments on laser installations in Japan (**Gekko XII**) and in USA (**Omega**) have demonstrated the stabilizing effect of foams on the **hydrodynamic instabilities** [10]. ●

Figure 3. Évolution temporelle de l'émission X de la mousse le long de la direction de propagation de l'impulsion laser (a) et vitesse du front d'ionisation au cours du temps (b). Time-resolved X-ray emission from the foam along the direction of propagation, showing the propagation of the ionization front (a) and temporal evolution of the ionization front velocity (b) as extracted from panel (a).



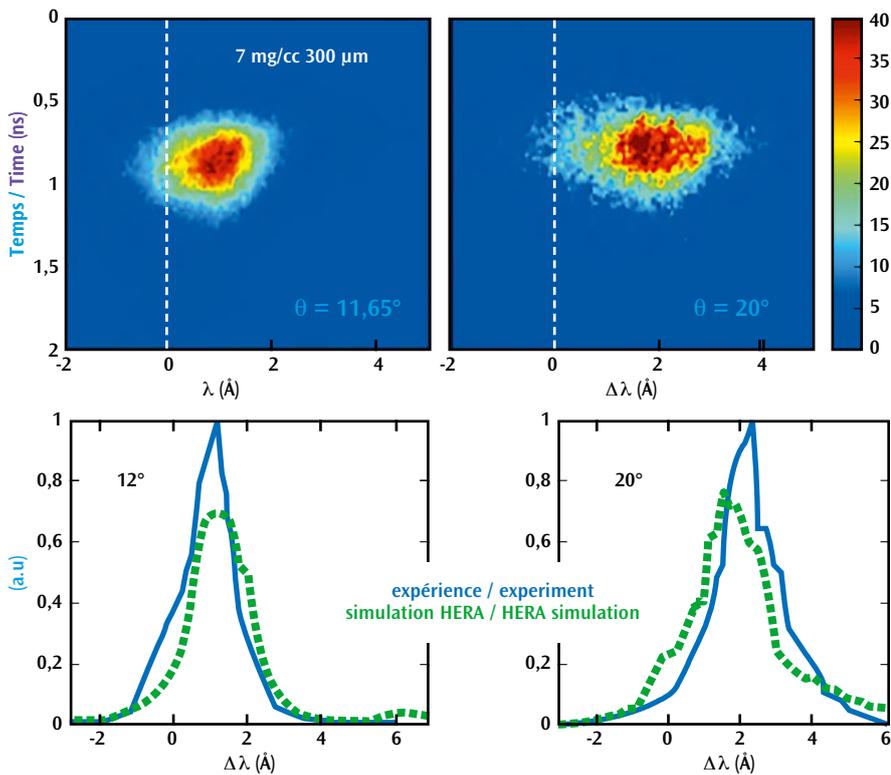


Figure 4. Comparaison des spectres de la lumière diffusée à 12° et à 20° vers l'avant de l'expérience avec ceux calculés par le code HERA.
Comparison of the spectra of the forward scattered light measured at 12° and 20° from the laser axis and those calculated with the HERA code.

Cinq diagnostics dans le domaine visible et X ont été utilisés pour caractériser la propagation du faisceau laser et l'empreinte sur la feuille de cuivre. La réduction de l'empreinte laser est démontrée par la comparaison des images X, intégrées sur 200 ps, de la feuille de cuivre lorsqu'elle est irradiée directement par le laser ou lorsqu'elle est placée derrière une mousse d'épaisseur 500 μm et de densité 10 mg/cc [1]. Dans le cas de l'irradiation directe, des fluctuations importantes de l'émission, semblables à celles du laser dans le vide, sont observées. En présence de mousse, l'émission est lissée et les inhomogénéités de ~ 50 μm sont éliminées, et celles d'échelle plus petite sont fortement réduites. Ce lissage est expliqué par l'augmentation de l'incohérence du laser lors de la traversée de la mousse [5], caractérisée par l'élargissement du diagramme angulaire et par le spectre de la lumière transmise. Des exemples de spectres transmis à 12° et à 20° de l'axe du faisceau sont présentés sur la figure 4. On observe dans les deux cas un déplacement spectral vers les grandes longueurs d'onde, plus

élevé à 20° qu'à 12°, et bien reproduits par les simulations du code HERA [6].

Les simulations numériques à trois dimensions effectuées avec le code PARAX [7], à partir des paramètres plasma de CHIC, ont montré que le lissage est produit par la diffusion du faisceau laser sur les fluctuations de densité dues à la **diffusion Brillouin stimulée** vers l'avant et à l'auto-focalisation [8], ces observations étant en accord avec le décalage vers le rouge des spectres précédents. La distribution d'intensité laser à différents instants calculée avec le code Harmony 2D [9] démontre la réduction des surintensités au cours du temps.

La mousse sous-dense permet un lissage du faisceau laser en avant de la zone d'absorption et l'obtention d'une pression d'ablation homogène sur une durée suffisamment longue pour qu'une zone de conduction thermique s'établisse dans la cible. Les expériences suivantes sur les installations laser au Japon (Gekko XII) et aux États Unis (Omega) ont permis de démontrer l'effet stabilisant du lissage par des mousses sur les **instabilités hydrodynamiques** [10]. ●

Références References

- [1] S. DEPIERREUX *et al.*, "Laser smoothing and imprint reduction with a foam layer in the multikilojoule regime", *Phys. Rev. Lett.*, **102**, 195005 (2009).
- [2] C. LABAUNE *et al.*, "Filamentation in long scale length plasma: Experimental evidence and effects of laser spatial incoherence", *Phys. Fluids*, **B4**, 2224 (1992).
- [3] P.-H. MAIRE *et al.*, "A cell-centered Lagrangian scheme for two-dimensional compressible flow problems", *SIAM J. Sci. Comput.*, **29**, p. 1781-1824 (2007).
- [4] S. YU. GUS'KOV *et al.*, "Laser-supported ionization wave in under-dense gases and foams", *Phys. Plasmas*, **18**, 103114 (2011).
- [5] A. SCHMITT, B. AFEYAN, "Time-dependent filamentation and stimulated Brillouin forward scattering in inertial confinement fusion plasmas", *Phys. Plasmas*, **5**, p. 503-516 (1998).
- [6] P. BALLEREAU *et al.*, Coupling hydrodynamics with a paraxial Solver for laser propagation, *J. Sci. Comput.*, **33**, p. 1-24 (2007).
- [7] G. RIAZUELO, G. BONNAUD, "Coherence properties of a smoothed laser beam in a hot plasma", *Phys. Plasmas*, **7**, p. 3841-3844 (2000).
- [8] M. GRECH *et al.*, "Coherent forward stimulated Brillouin scattering of a spatially incoherent laser beam in a plasma and its effect on beam spray", *Phys. Rev. Lett.*, **102**, 155001 (2009).
- [9] S. HÜLLER *et al.*, "Harmonic decomposition to describe the nonlinear evolution of stimulated Brillouin scattering", *Phys. Plasmas*, **13**, 022703 (2006).
- [10] M. OLAZABAL-LOUMÉ *et al.*, "Simulations on laser imprint reduction using underdense foams and its consequences on the hydrodynamic instability growth", *New Journ. Phys.*, **15**, 085033 (2013).

3.

M. KOENIG, N. AMADOU, A. BENUZZI-MOUNAIX, E. BRAMBRINK, T. VINCI / LULI, École polytechnique, Palaiseau
F. GUYOT, G. MORARD / IMPMC, Université Pierre et Marie Curie, MNHN Paris
T. DE RESSEGUIER / Institut P², CNRS, ENSMA, Université de Poitiers
S. MAZEVET / LUTH, Observatoire de Paris, Meudon / CEA – DAM Île-de-France
G. HÜSER / CEA – DAM Île-de-France

L'étude des intérieurs planétaires de type terrestre : un enjeu pour les lasers intenses

Une des motivations de la planétologie et de l'exploration planétaire est de comprendre si l'état actuel de la Terre résulte d'une nécessité raisonnablement prédictible ou si la contingence est dominante [1]. En d'autres termes, dans l'Univers, des planètes comparables à la Terre sont-elles quasi absentes ou au contraire relativement fréquentes ? Dans le système solaire, Vénus et Mars servent de points de comparaison. Mais cette quête scientifique souffre d'une statistique faible (trois planètes). En ce sens, la découverte de planètes de type terrestre extrasolaires, c'est-à-dire gravitant autour d'étoiles différentes du Soleil,

est une révolution scientifique, de portée copernicienne. Une dizaine de « super-Terres » ont d'ores et déjà été identifiées, alors que cela semblait *a priori* difficile avec les moyens disponibles. La mise en œuvre d'outils spécifiques au cours des dix prochaines années va contribuer à la découverte d'une grande diversité planétaire et, à côté d'interrogations sur les propriétés spectroscopiques de surface et la chimie des atmosphères, se posera la question des structures internes : le schéma terrestre avec un noyau métallique liquide, siège d'une dynamo, entouré d'un manteau rocheux, est-il général ? En d'autres termes, la courbe de fusion du fer et

de ses alliages est-elle compatible avec une phase liquide dans le noyau pour les planètes de masse supérieure à la Terre ? D'autres structures de base sont-elles observables ? La recherche se focalisera sur des objets telluriques plus gros que la Terre, plus facilement détectables, donc identifiés en plus grand nombre.

Atteindre en laboratoire les pressions et températures caractéristiques du centre des planètes de type terrestre du système solaire ou extrasolaires s'avère donc nécessaire pour élucider la structure, la composition, l'histoire et la dynamique de ces objets. Des conditions extrêmes règnent dans le cœur de ces

Study of the Earth-like planetary interiors: a challenge for high-energy lasers

The main motivation for the planetary physics and planetary exploration is to understand whether the current state of the Earth is the result of a reasonably predictable or if the contingency is dominant [1]. In other words, are Earth-like planets in the Universe rare or relatively frequent? In the solar system, Venus and Mars serve for comparison. However, these three planets do not cover all possible cases. In this sense,

the discovery of Earth-like extrasolar planets, orbiting around other stars, is a scientific revolution on a Copernican scale. A dozen of "super-Earths" has already been identified. This is an extremely difficult endeavour with the available resources. Implementation of dedicated tools in the next decade will contribute to the discovery of a large number of such planets. Besides the questions related to the spectroscopic properties and

surface chemistry of the atmosphere, the internal structure of these objects needs to be understood: Is the Earth structure with a liquid metal core, location of a dynamo effect, surrounded by a rocky mantle, general? In other words, is the melting curve of iron and its alloys compatible with a liquid phase in the core for planets having larger mass than Earth? Are other basic structures observable? The objects larger than Earth are in

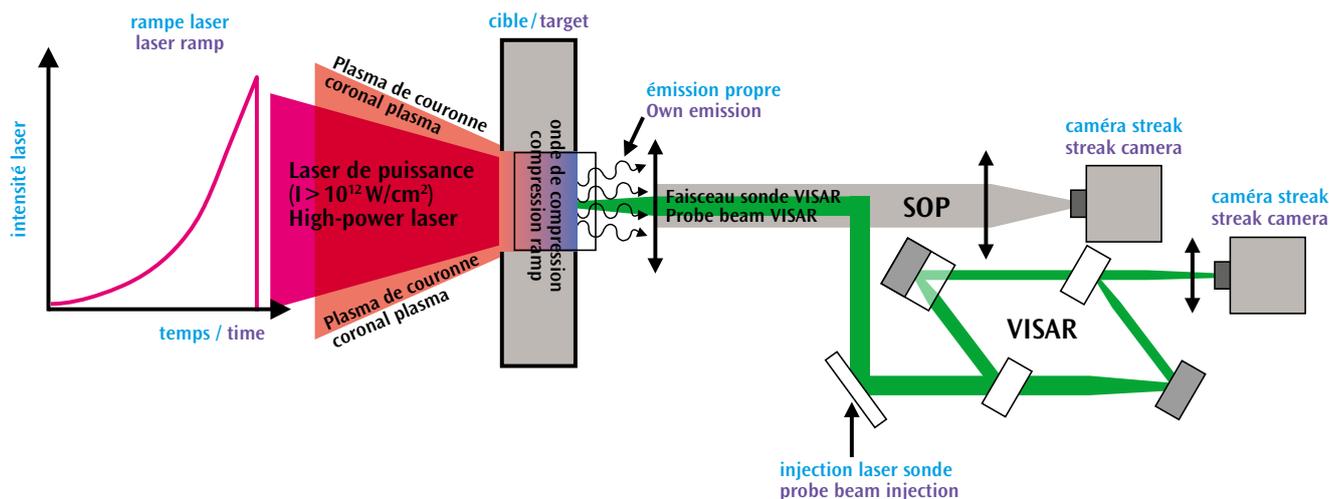


Figure 1. Schéma de l'expérience de compression quasi isentropique sur la LIL. L'impulsion laser mise en forme temporellement génère une onde de compression qui se propage à l'intérieur de la cible et débouche en face arrière. Cela s'accompagne de sa mise en vitesse et de l'émission d'un rayonnement propre. Ces paramètres sont mesurés grâce à un interféromètre de type VISAR et du pyromètre optique SOP. Experimental set-up of the quasi-isentropic compression experiment on LIL. The shaped laser pulse generates a pressure wave that propagates into the target and breaks out at the rear surface. Its velocity and thermal self-emission are measured with two instruments: an interferometer VISAR and the optical pyrometer SOP.

planètes, les pressions variant de 300 à 3 500 GPa et les températures associées de 5 000 à 8 000 K. L'objectif est alors d'atteindre simultanément ces conditions en laboratoire.

Les méthodes classiques de compression statique en cellules à enclumes de diamant ont leur limite supérieure actuelle aux environs de 300 GPa si l'on veut effectuer un chauffage simultané à

quelques milliers de degrés Kelvin. Les méthodes de compression dynamique (explosifs, canons, laser) ne sont pas bornées en pression dans ce domaine. Elles sont donc potentiellement intéressantes pour l'étude de la Terre [2] ou de planètes telluriques plus grosses que la Terre (les « super Terres »), mais elles produisent des températures trop importantes. Une autre voie possible est de profiler

the focus of this research that are easier to detect, and so a greater statistics will be available.

It is therefore necessary to reach in the laboratory the pressures and temperatures characteristic to the Earth-like planetary cores and to elucidate their structure, composition, history and dynamics. Extreme conditions prevail in the core of such planets: the pressures are ranging from 300 to 3,500 GPa and the associated temperatures – from 5,000 to 8,000 K. The objective of our LIL experiment was achieving simultaneously these conditions.

Conventional methods of static

compression in diamond anvil cells attain their upper limit around 300 GPa if one wants to perform simultaneous heating to a few thousand K. Dynamic compression methods (explosives, guns, lasers) are not bounded in this pressure range. They are therefore potentially interesting for studies of the Earth [2] or larger terrestrial planets (the "Super Earths"), but a fast compression in a shock produces excessive temperatures. Another possible approach is to achieve a reversible adiabatic compression by a gradual increase of the pressure. A shaped pulse of a high-energy laser produces

a shockless compression in the sample. The pressure follows a reversible adiabatic path similarly to the planets isentropes. A consortium of physicists from LULI, CEA - DAM, the IMPMC, and the University of Poitiers supported by the National Research Agency developed such a ramped laser pulse technique on the LULI2000 laser facility [3]. The experiment carried out on the LIL facility allowed to deposit a much higher energy and to attain a high compression without excessive heating of a sample.

The high power LIL laser pulse was precisely shaped with the goal

3.

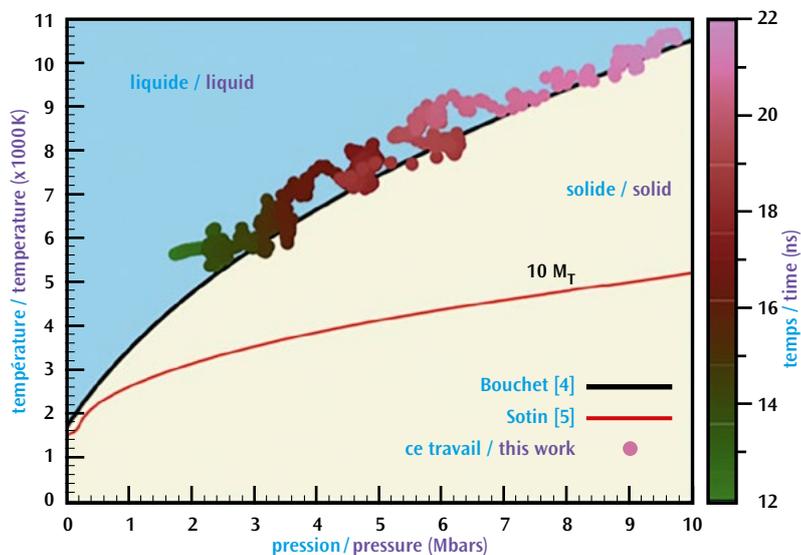


Figure 2. Mesures expérimentales obtenues sur la LIL (cercles pleins) dans un diagramme pression-température comparées avec les prédictions théoriques de la courbe de fusion du fer. Celle-ci est représentée (courbe noire) ainsi que le chemin thermodynamique de l'intérieur des exoplanètes telluriques de 10 masses terrestres (courbe rouge).
Experimental measurements obtained on the LIL (closed circles) in the pressure-temperature diagram. They are compared with the theoretical predictions of the melting curve of the iron (black line) and the thermodynamic path of terrestrial exoplanets having 10 Earth mass (red curve).

les impulsions d'un laser de puissance certes dynamique mais relativement progressive, limitant le chauffage lié à la dissipation dans le front de choc. Une compression sans choc, suivant une adiabatique réversible, donc **isentrope** comme dans les planètes, constituerait la limite de telles compressions dites en rampe. Cette voie a été poursuivie au **LULI2000** [3] par un consortium de physiciens du **LULI**, du **CEA - DAM**, de l'**IMPMC** et de l'**université de Poitiers** dans une recherche soutenue par l'**agence nationale de la recherche (Projet SECHEL)** suivi du **projet PLANETLAB**.

Nous montrons dans l'expérience effectuée sur la **LIL** comment les lasers de puissance permettent de déposer l'énergie nécessaire à une

to reach the super-Earths core conditions. The optimised temporal shape shown in *Figure 1* permitted us to achieve the highest possible pressure with an isentropic compression. By a careful choice of the target structure, we created a moderate strength initial shock, which pre-compresses the material and heats it to a temperature of 2,000 – 4,000 K. Then the main rump produces the reversible compression along the chosen **isentrope**. This technique allows us to achieve the thermodynamic conditions of higher mantle of the planets.

Such a laser pulse generates a pressure wave that propagates into the target, breaking out at the rear surface (*Figure 1*). Two main physical phenomena are associated with the breakout: a set in motion of the rear surface and a black or grey body self-emission. The measurement, resolved in time and space, of these two processes allows us to deduce all thermodynamic states reached by the material during the compression.

To access the fundamental parameters (pressure and temperature) inside the sample, two main diagnos-

tics have been implemented: the **VISAR** and **SOP**. The first one is an interferometer, which allows determining the Doppler velocity of the rear surface and consequently the pressure related to the velocity through the **equation of state**. The second diagnostic records the self-emission of the rear interface where the velocity measurement was performed. From this measurement, it is possible to deduce the second key parameter, the temperature. Thanks to the innovative technology offered on the **LIL**, we could compress the iron

forte compression sans induire de chauffage excessif.

Dans cette expérience, nous avons utilisé la puissance du faisceau de la **LIL** ainsi que la possibilité de la mise en forme temporelle précise de l'impulsion pour atteindre les conditions du cœur terrestre et des « super Terres ». Pour y parvenir, la forme temporelle a été optimisée (*figure 1*) afin d'atteindre la pression la plus élevée, en compression isentropique pure, au regard de la durée de l'impulsion et de l'énergie disponible. Par un choix judicieux de la structure de la cible, nous avons pu créer un choc modéré pour comprimer la matière et légèrement la chauffer (2 000 – 4 000 K) afin de se situer, au départ de la rampe, dans les conditions thermodynamiques des

manteaux supérieurs planétaires.

La rampe laser ensuite appliquée, génère une onde de compression qui se propage à l'intérieur de la cible, puis débouche en face arrière (*figure 1*). Deux phénomènes physiques principaux sont associés à ce débouché : une mise en vitesse de la surface arrière et une émission de rayonnement de type corps noir ou gris. La mesure, résolue en temps et en espace, de ces deux phénomènes nous permet alors de déduire l'historique de l'état de la matière au cours de la compression.

Afin d'accéder aux deux paramètres fondamentaux (pression et température), deux diagnostics visibles essentiels dans le domaine des hautes pressions générées par laser sont mis en œuvre : le **VISAR** et la **SOP**. Le premier est un interféromètre qui

permet par effet Doppler de déterminer la vitesse de la face arrière, et donc la pression à partir de l'**équation d'état**. Le second enregistre l'émission propre de l'interface où la mesure de vitesse s'effectue. De cette mesure, il est possible de déduire le second paramètre essentiel, la température.

Grâce à la technique innovatrice proposée sur la **LIL**, nous avons pu comprimer le fer jusqu'à des pressions et températures de 1 TPa et 10 000 K respectivement (*figure 2*). La mesure expérimentale est en très bon accord avec la prédiction théorique de la courbe de fusion du fer [4] (*figure 2*). Cela laisse penser que les exoplanètes ont un cœur complètement solide. C'est un résultat important qui ouvre la voie à une nouvelle classe d'expériences à finaliser sur le **LMJ+PETAL**. ●

up to pressures of 1 TPa and temperatures of 10,000 K, respectively (*Figure 2*). The experimental measurements are in good agreement with the theoretical prediction of the melting curve [4] of iron suggesting that these exoplanets have a completely solid core. This is an important result, which paves the way for a new class of experiments that could be conducted on the **LMJ + PETAL** facility. ●

Références / References

- [1] C. JAUPART, S. LABROSSE, J.-C. MARESCHAL, "Temperature, heat and energy in the mantle of the Earth", In Schubert G.(Ed), *Treatise on Geophysics.*, Vol. 7. Elsevier Ltd., p. 253-304 (2007).
- [2] G. HUSER, M. KOENIG, A. BENUZZI-MOUNAIX, E. HENRY, T. VINCI, B. FARAL, M. TOMASINI, B. TELARO, D. BATANI, "Temperature and melting of laser-shocked iron releasing into an LiF window", *Phys. Plasmas*, **12**, 060701-1-4 (2005).
- [3] N. AMADOU, E. BRAMBRINK, A. BENUZZI-MOUNAIX, G. HUSER, F. GUYOT, S. MAZEVET, G. MORARD, T. DE RESSEGUIER, T. VINCI, K. MYANISHI, N. OZAKI, R. KODAMA, T. BOEHLI, O. HENRY, D. RAFFESTIN, M. KOENIG, "Direct laser-driven ramp compression studies of iron: A first step toward the reproduction of planetary core conditions", *High Energy Density Physics*, **9**(2), p. 243-246 (2013).
- [4] J. BOUCHET, S. MAZEVET, G. MORARD, F. GUYOT, R. MUSELLA, "Ab initio equation of state of iron up to 1500 Gpa", *Phys. Rev. B*, **87**(9), 094102 (2013).
- [5] C. SOTIN, O. GRASSET, A. MOCQUET, "Mass radius curve for extrasolar Earth-like planets and ocean planets", *Icarus*, **191**(1), p. 337-351 (2007).

4.

C. MICHAUT / LUTH, Observatoire de Paris
M. KOENIG / LULI, École polytechnique, Palaiseau
S. BOUQUET, A. CASNER, S. LAFFITE, D. RAFFESTIN / CEA – DAM
P. BARROSO / GEPI, Observatoire de Paris
S. LE PAPE / Lawrence Livermore National Laboratory, USA
P. DRAKE / Department of Atmospheric Oceanic and Space Sciences, University of Michigan, USA

Performing radiative shocks for laboratory astrophysics

Extraordinary movements of matter taking place in the Universe, because stars arise and die perpetually. This cycle is completed ceaselessly because the big and fast quantities of ejected matter, during the star formation or during their explosion, form shocks moving in the interstellar medium of the galaxies, and which participate in the birth of new stars by getting some energy into other zones of the interstellar medium. The challenge in astrophysics is to know and to quantify the transport of kinetic energy and of

radiation in the interstellar medium, how it favors the creation of new stars that will have an influence themselves on the evolution of the galaxy.

A shock forms when the speed of matter movement is faster than the local sound speed. But in the Universe the involved energies are so extreme that these so-strong shocks compress and warm the matter, which emits the radiation. This type of shock is called a radiative shock.

The behavior of the fast, hot and dense matter is not known empirically on Earth. The matter

propagation and the production or the absorption of photons become entangled and provide a really complex physics which remains difficult to calculate and requires a very complicated mathematical strategy. That is why the laboratory experiments are going to help the astrophysicist towards the modeling of these phenomena [1].

In order to produce such radiative shocks, it is necessary to deposit a lot of energy inside matter [2]. Only the facilities delivering a big quantity of energy in a small volume are capable

Chocs radiatifs d'intérêt astrophysique

D'extraordinaires mouvements de matière sont en activité dans l'Univers parce que des étoiles naissent et meurent perpétuellement. Ce cycle s'accomplit sans cesse car les grandes et rapides quantités de matière éjectées, lors de la formation d'étoile ou bien lors de leur explosion, vont former des chocs se déplaçant dans le milieu interstellaire des galaxies, eux-mêmes participant à la naissance de nouvelles étoiles en procurant de l'énergie à d'autres zones du milieu interstellaire. L'enjeu en astrophysique est de connaître et de quantifier le transport d'énergie cinétique et de radiation dans le milieu interstellaire, et de comprendre comment il favorise la création de nouvelles étoiles

qui elles-mêmes auront une influence sur l'évolution de la galaxie.

Un choc est formé lorsque la vitesse de déplacement de la matière est supérieure à la vitesse du son locale. Mais, dans l'Univers, les énergies mises en jeu sont tellement extrêmes que ces chocs, si forts, compriment et chauffent à tel point la matière que celle-ci émet du rayonnement. Ce sont des chocs radiatifs.

Le comportement de cette matière, rapide, dense, très chaude n'est pas connu empiriquement sur Terre. La physique complexe où s'entremêlent la propagation de la matière et la production ou l'absorption de photons reste difficile à calculer et requiert une stratégie mathéma-

tique compliquée. C'est pourquoi les expériences de laboratoire vont aider l'astrophysicien vers la modélisation de ces phénomènes [1].

Cependant, pour produire de tels chocs radiatifs, il faut y déposer beaucoup d'énergie [2]. Seules les installations délivrant une grande quantité d'énergie dans un tout petit volume sont capables de déclencher de tels phénomènes. C'est pourquoi, les lasers de puissance sont les outils appropriés pour faire de l'astrophysique de laboratoire.

Dans notre expérience, le gaz est emprisonné dans de petites cellules étanches qui sont munies d'une fenêtre afin de laisser s'échapper la lumière et de pouvoir observer ce qu'il



Figure 1.
Photographie de la cible laser.
Les capillaires servent à remplir la cellule en gaz.
Photography of the laser target.
Capillaries are used to fill in gas the cell.

of driving such phenomena. That is why high-energy lasers are appropriate tools to perform laboratory astrophysics.

In our experiment, we used a gas target maintained inside small cells which have a window to allow the light to escape and to be able observing what takes place inside (Figure 1). The front side of the cell is a microscopic sandwich of plastic and metals which allows converting the laser energy into a shock wave, which is setting the gas in movement (Figure 2).

In order to determine the physical characteristics of the radiative shock, we used several diagnostics. They needed to have high temporal resolution [3] (indeed the character-

istics time of the phenomenon is on the order of nanosecond):

i) **interferometric diagnostics.**

A small probe laser beam undergoes a round trip in the cell: it enters through the side window and is sent back to the opposite direction by a mirror. By interferometric recombination of the two beams, we have access to the propagation velocity of the gas, as well as to the density of electrons.

ii) **self-emission diagnostics.**

By means of a special ultra-fast imager, we measured the evolution in time of the temperature and the velocity along the propagation axis, and we obtained an image of the shock profile at the chosen moment giving the shock shape and the number of

se passe à l'intérieur (figure 1). La face avant de la cellule est un sandwich microscopique de plastique et métaux qui permet de convertir l'énergie laser en une onde choc qui va mettre le gaz en mouvement (figure 2).

Afin de cerner la physique du choc radiatif, des mesures sont nécessaires. Les diagnostics doivent avoir une haute résolution temporelle [3] (en effet, le temps caractéristique de ce phénomène est de l'ordre de la nanoseconde):

i) **diagnostics interférométriques.** Un petit faisceau laser sonde fait un aller-retour transverse à la cellule : il entre par la fenêtre latérale et est renvoyé à l'opposé par un miroir. Par recombinaison interférométrique des faisceaux aller et retour, nous avons accès à la vitesse de propagation du gaz, ainsi qu'à la densité des électrons.

ii) **diagnostics d'émission propre.** À l'aide d'une caméra spéciale résolue en temps, nous mesurons l'évolution temporelle de la température et de la vitesse tout le long de l'axe de propagation, et nous obtenons une image 2D de profil du choc, à un instant choisi, qui nous donne sa forme

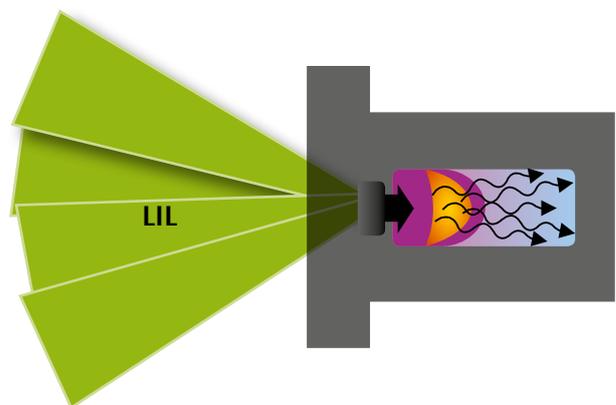


Figure 2.
Vue latérale de la cellule de gaz et schéma de principe de propagation du choc radiatif après que les lasers aient mis en mouvement la matière.
Lateral view of the gas-cell target, and scheme of the radiative shock propagation after laser beams drive the matter in movement.

4.

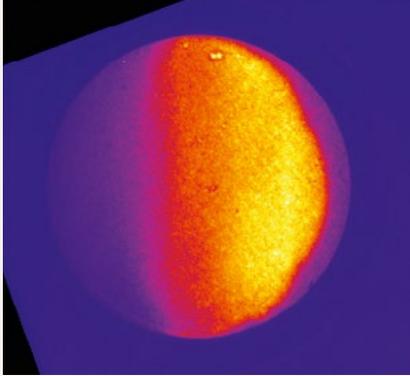


Figure 3.
Image 2D d'un choc radiative prise à 8 ns
après le tir laser.
2D picture of a radiative shock 8 ns after
the laser shot.

escaping photons (Figure 3).

Experiments have been performed with two type of gas: krypton and xenon at low pressure, 50 mbar, using a laser energy between 4 and 8 kJ. We used rare and heavy gases because they emit rather easily radiation, allowing entering in a radiative regime more easily. The laser beams irradiate a surface smaller than 1 mm^2 , during 2 ns providing laser intensity onto the target between 3 and $6 \times 10^{14} \text{ W/cm}^2$.

We measured the shock speed, between 120 and 165 km/s corresponding to Mach numbers larger than 500. That is, the shocks are very hypersonic because their speed is at least 500 times the upstream sound velocity.

The data analysis also shows that they are hot with a temperature behind the shock about 300 000 K or 30 eV.

By analyzing the data, we can reconstruct the profile of the shock emission, including its rear structure, *i.e.* the shocked and dense zone, and its front structure, *i.e.* the radiative precursor (Figure 4). Indeed, the radiation emitted during the gas compression escapes in all directions. But ahead, the gas was still in its initial state, which is cold and has a low-density, then it absorbs a small part of this radiation and let another part escape. It thus becomes a little hotter.

By comparing the experimental results and two-dimensional numerical radiative hydrodynamic

et permet de remonter au nombre de photons émis (figure 3).

Les expériences ont été conduites avec deux types de gaz : du krypton et du xénon à basse pression, 50 mbar, et avec une énergie laser entre 4 et 8 kJ. Ces gaz rares et lourds sont utilisés pour leur propriété d'émettre assez facilement du rayonnement, permettant d'atteindre plus facilement un régime radiatif. Les faisceaux lasers éclairent une surface inférieure à 1 mm^2 , pendant 2 ns, fournissant une intensité laser sur cible entre 3 et $6 \times 10^{14} \text{ W/cm}^2$.

Les résultats ont montré des chocs se propageant à très grande vitesse, entre 120 et 165 km/s leur conférant des nombres de Mach toujours supérieurs à 500, c'est-à-dire qu'ils sont bien hypersoniques puisque leur vitesse est au moins 500 fois celle du

son. L'analyse des données montre qu'ils sont chauds avec une température estimée de l'ordre de 300 000 K.

En analysant les données, nous pouvons reconstruire le profil d'émission du choc, comprenant sa structure arrière avec la zone choquée et dense, et sa structure avant avec le précurseur radiatif (figure 4). En effet, le rayonnement émis lors de la compression du gaz part dans toutes les directions. Mais vers l'avant, le gaz était encore dans sa nature initiale, c'est-à-dire froid et à basse densité ; il absorbe une petite quantité de ce rayonnement et en laisse passer une autre. Il devient donc un peu plus chaud.

En confrontant les résultats expérimentaux et les simulations numériques bidimensionnelles de l'hydrodynamique radiative obtenues

avec le code FCI, nous constatons que l'émission dans le domaine visible de ces chocs n'est pas directement proportionnelle à leur température [4]. Le doigt est mis sur la difficulté de mesurer la température réelle à l'intérieur d'un plasma hors équilibre dont les bords sont très graduels. Une retombée immédiate de cette campagne de tirs, est que nous avons amélioré le code HADES de simulations astrophysiques afin d'adapter les **équations d'état** à un formalisme plus réaliste pour l'état de ces gaz rares et ionisés. Nous sommes, en effet, loin de la formulation classique des gaz parfaits.

Dans l'avenir, des améliorations sont nécessaires pour une meilleure interprétation des données expérimentales : i) d'autres mesures de la température basée sur la **diffu-**

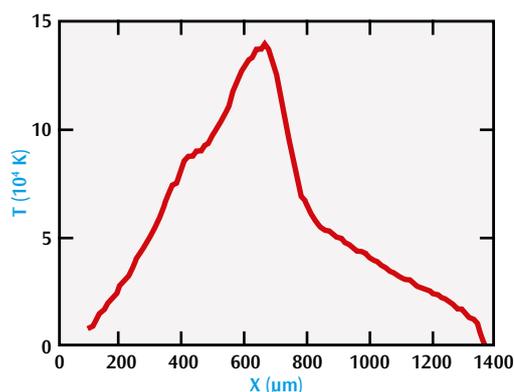
simulations performed using the FCI code, we notice that the visible emission of these shocks is not simply related to their temperature [4]. The highlight is the difficulty to measure the real temperature inside a non-equilibrium plasma exhibiting important edge gradients. An immediate fallout of this laser campaign is that we have to improve the code HADES of astrophysical simulations to adapt the equations of state to a more realistic formalism where gases are strongly ionized. We are indeed far from the classical formulation of ideal gases.

Several improvements are needed in the future for a better interpretation of experimental data: *i)* other

measurements of temperature are needed, possibly by using diagnostics based on **Thomson scattering**, *ii)* we need to perform emission spectroscopy of the gas in order to know the emitted lines improving our understanding of these plasmas, *iii)* finally, we need to use the X-radiography to better characterize the dense zones of the plasma. These objectives could be realized in future experimental studies on more powerful lasers such as **LMJ** and **NIF**.

This experiment received the support of the **ILP, National Program of Stellar Physics** of **INSU**, the Scientific Council of the **Observatoire de Paris**, and **CEA - DAM**. ●

Figure 4.
Profil de température d'un choc radiatif formé dans le xénon à 4 ns après le tir laser. Le profil se décrit en trois grandes zones : la zone post-choc de 100 à 660 μm , le front de choc de 660 à 800 μm , puis le précurseur radiatif de 800 à 1350 μm .
Temperature profile of a radiative shock in xenon, 4 ns after the laser shot. The profile has three main zones: the post-shock zone from 100 to 660 μm , the shock front from 660 to 800 μm , then the radiative precursor from 800 to 1350 μm .



sion Thomson, *ii)* la spectroscopie d'émission du gaz nous permettrait de connaître les raies d'émission afin de mieux comprendre ces types de plasmas, *iii)* finalement, l'ajout d'un diagnostic par radiographie X permettrait de mieux caractériser les zones denses du plasma. C'est l'objet

de l'étude en cours sur des lasers encore plus puissants, comme le **LMJ** et le **NIF**.

Cette expérience a reçu le soutien de l'**ILP**, du **Programme national de physique stellaire** de l'**INSU**, du Conseil scientifique de l'**Observatoire de Paris** et du **CEA - DAM**. ●

Références References

- [1] C. MICHAUT, E. FALIZE, C. CAVET, S. BOUQUET, M. KOENIG, T. VINCI, A. REIGHARD, R.P. DRAKE, "Classification of and recent research involving radiative shocks", *Astrophys. Space Sci.*, **322**, p. 77-84 (2009).
- [2] M. KOENIG, T. VINCI, A. BENUZZI-MOUNAIX, N. OZAKI, A. RAVASIO, M. RABEC LE GLOAHEC, L. BOIREAU, C. MICHAUT, S. BOUQUET, S. ATZENI, A. SCHIAVI, O. PEYRUSSE, D. BATANI, "Radiative shocks: An opportunity to study laboratory astrophysics", *Phys. Plasmas*, **13**, p. 056504-1-8 (2006).
- [3] S. BOUQUET, C. STEHLE, M. KOENIG, J. P. CHIEZE, A. BENUZZI-MOUNAIX, D. BATANI, S. LEYGNAC, X. FLEURY, H. MERDJI, C. MICHAUT, F. THAIS, N. GRANDJOUAN, T. HALL, E. HENRY, V. MALKA, J.-P.J. LAFON, "Observations of laser driven supercritical radiative shock precursors", *Phys. Rev. Lett.* **92**, p. 225001-1-4 (2004).
- [4] C. MICHAUT, M. KOENIG, A. CASNER, S. BOUQUET, S. LE PAPE, P. BARROSO, D. RAFFESTIN, "Highly radiative shocks on Laser Integration Line", *Proc. 8th Int. Conf. on Inertial Fusion Sciences and Applications (IFSA'13)*, Nara, Japan, September 8-13, 2013.

5.

A. BENUZZI-MOUNAIX, T. VINCI, E. BRAMBRINK, A. RAVASIO, M. KOENIG / LULI, École polytechnique, Palaiseau
S. MAZEVET / LUTH, Observatoire de Paris, Meudon / CEA – DAM Île-de-France
S. BRYGOO / CEA – DAM Île-de-France
F. GUYOT, G. MORARD / IMPMC, Université Pierre et Marie Curie, MNHN Paris

Le quartz aux conditions des cœurs d'Uranus et de Neptune

Les silicates constituent un composant majeur non seulement des planètes telluriques (de type terrestre), mais également des cœurs de planètes géantes. Les principaux minéraux envisagés dans ces objets sont : MgO , SiO_2 , $MgSiO_3$ and Mg_2SiO_4 . D'après les scénarios de formation de planètes géantes, ils seraient même les principaux ingrédients des embryons proto-planétaires [1]. Ils pourraient s'agglomérer jusqu'à atteindre une taille supérieure à plusieurs fois celle de la Terre et accrêter de l'hydrogène et de l'hélium dont la masse pourrait atteindre plusieurs fois celle de Jupiter ou de Saturne. Mais les propriétés de ces silicates dans des états de pression et de température extrêmes, très importantes dans les modèles de planètes, sont peu connues et doivent être mieux contraintes [2]. Par exemple, en devenant liquides, ils influenceraient potentiellement les effets de dissipation et de marée, effets clés pour la compréhension de la stabilité des systèmes planétaires. Leur réactivité avec l'hydrogène pourrait conduire à de l'érosion des cœurs de planètes géantes. Leur différenciation pourrait affecter leur luminosité si elle menait à une perte de chaleur importante. Dans le cas des exoplanètes, les conditions peuvent atteindre plusieurs dizaines de Mbar mais des températures relativement modestes, inférieures à l'eV ($1\text{eV} = 11\,600\text{ K}$). Les calculs *ab initio* ont permis de nombreux progrès dans la description théorique de ces états. Leur caractère prédictif nécessite toutefois une validation expérimentale. Le premier écueil à surmonter est la génération en laboratoire de ces conditions si extrêmes.

Les compressions dynamiques par choc laser peuvent aisément amener la matière à de telles pressions, mais le saut d'entropie lié à l'irréversibilité du choc provoque un chauffage important. Depuis quelques années la communauté des plasmas denses, en forte synergie avec les planétologues, s'est concentrée sur le développement de technique de compressions alternatives [3].

Sur la *figure 1*, nous montrons le diagramme de phase du quartz où sont représentées l'**Hugoniot** (ensemble des états qu'on atteint avec un choc), l'**isentrope** et les conditions à l'intérieur des noyaux de Neptune, Uranus

et Saturne ainsi que des super Terres. Les **isentropes** planétaires passent par les régions où la température se situe entre l'**isentrope** et l'**Hugoniot** (pour une pression donnée).

L'expérience réalisée sur la **LIL** avait pour objectif de développer une technique bien maîtrisée de compression pour atteindre ces conditions planétaires, de mesurer le chemin thermodynamique (P,T) de la compression et d'étudier ainsi le diagramme de phase aux alentours de la courbe de fusion. Dans ce but, une impulsion laser profilée *ad hoc* (*figure 2*) a été développée avec succès et a permis de générer dans

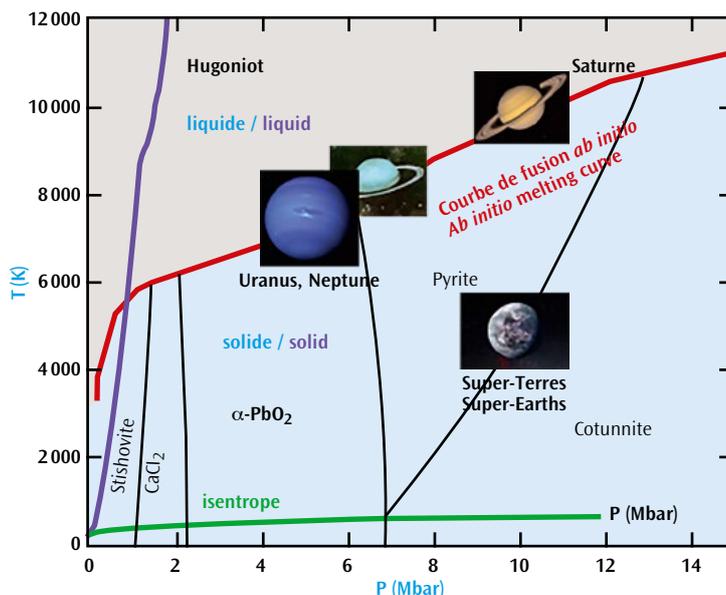


Figure 1. Diagramme de phase du SiO_2 basé essentiellement sur des calculs *ab initio*. L'Hugoniot et l'isentrope sont issues des tables d'équations d'état SESAME. La courbe de fusion a été récemment calculée jusqu'à 40 Mbar et ce travail [4] a mis en évidence la présence de SiO_2 liquide à l'intérieur de Jupiter et Saturne. SiO_2 phase diagram based mainly on *ab initio* calculations. Hugoniot and isentrope curves are from SESAME tables. Mazevet *et al.* [4] calculated the melting curve up to 40 Mbar by and also revealed the presence of liquid SiO_2 in Jupiter and Saturn.

Quartz at the conditions of Uranus and Neptune's cores

Silicates are major constituents of telluric planets and giant planet's cores. The main minerals in these objects are: MgO , SiO_2 , $MgSiO_3$ and Mg_2SiO_4 . According to the scenarios of giant planet formation, they would even be the main ingredients of the proto-planetary embryos [1]. In this picture, silicates could agglomerate and reach a mass until a few times larger than that of the Earth and accrete hydrogen and helium whose mass could be several times that of Jupiter or Saturn. The properties of silicates in the extreme conditions in temperature and pressure are very important for planetary models and need to be better constrained [2]. For example, becoming liquid, they would potentially impact dissipation and tidal effects that are fundamental to understand the stability of planetary systems. Their reactivity with hydrogen could lead to the erosion

of the cores of such giant planets. Their differentiation could affect their brightness if this was associated to a significant loss of heat. In the case of exoplanets, typical conditions can reach very high pressures (several tens of Mbar), but relatively low temperatures, less than the eV ($1\text{eV} = 11,600\text{ K}$). *Ab initio* calculations allowed important progress in the theoretical description of these states. However, their predictive capability needs an experimental validation. The first issue to be solved is the generation in the laboratory of such states. The dynamic compression using a laser shock can easily bring matter at these pressures but the entropy jump connected to the irreversible nature of shock compression induces an important heating. In recent years, the dense-plasma community in strong synergy with planetologists, has focused on

developing alternative compression techniques [3].

In Figure 1, we show the phase diagram of quartz where **Hugoniot** curve (defined as the ensemble of states, which can be attained with a shock), **isentropes** and the conditions inside Neptune, Uranus and Saturne and Super Earths are presented. Planetary **isentropes** are in the temperature regions between the **Hugoniot** and the **isentropes** (at a fixed pressure).

The goal of the experiment performed at the LIL was to develop a well-controlled compression technique in order to achieve planetary conditions, to measure the thermodynamical path (P,T) of compression, and to study the region around the melting. To this aim, an *ad hoc* profiled laser pulse (Figure 2) has been developed and allowed generating a first weak shock followed by a

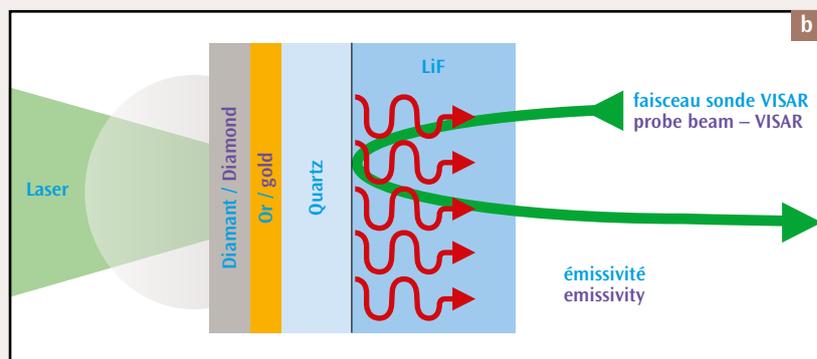
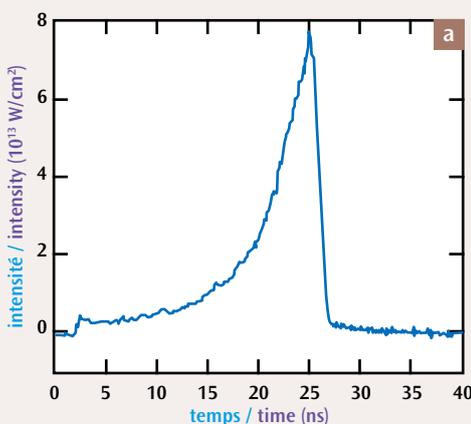


Figure 2.

(a) : impulsion laser profilée en temps développée par l'équipe technique de la LIL pour cette campagne expérimentale. (b) : schéma de la cible. Le diamant (20 μm) a été choisi comme ablateur et l'or (2 μm) avait le rôle d'éliminer les problèmes de préchauffage dus à l'émission X de la couronne. Entre le SiO_2 (typiquement 60 ou 80 μm) et le LiF (500 μm) une épaisseur fine de Ta (0,1 μm) a été utilisée comme couche réfléchissante.

(a): laser profile developed by technical staff of LIL for this experimental campaign. (b): scheme of the target.

Diamond (20 μm) was chosen as ablator and gold (2 μm) avoided preheating by absorbing coronal X-ray emission. Between SiO_2 (typically 60 or 80 μm) and LiF (500 μm) a thin layer of Ta (0.1 μm) has been used as a reflecting layer.

5.

une cible constituée de C-Au-SiO₂-LiF un premier choc relativement faible, suivi d'une compression dite quasi isentropique grâce à laquelle l'augmentation de température est minimisée. On appelle compression quasi isentropique une compression créée par une succession d'ondes sonores. Typiquement, on peut l'obtenir avec un profil laser long en temps et avec une intensité qui augmente très lentement au cours du temps. Un piédestal dans le profil laser permet de générer le choc préalable à la compression quasi isentropique. Ici, les faisceaux laser sont focalisés sur la cible avec une tache focale de 800 µm homogène grâce à l'utilisation de lame de phases. Les diagnostics principaux s'appuyaient sur deux interféromètres de type VISAR qui fournissent la vitesse de l'interface SiO₂/LiF et sur un diagnostic d'émissivité qui mesure de la lumière émise par cette interface. Nous montrons sur la figure 3 deux images VISAR typiques obtenues avec 1kJ et 4kJ et deux intensités du piédestal différentes. On voit que pour les deux tirs, nous avons bien mesuré un saut de franges dû au premier choc et ensuite un déplacement de franges graduel. Nous notons ici qu'en utilisant la formule de l'effet Doppler, nous avons une relation connue entre le déplacement d'une frange et la vitesse. Dans le cas du tir à faible énergie, nous avons pu mesurer la phase de compression ainsi que l'onde de détente qui survient une fois que le laser s'éteint. Ceci montre bien le caractère quasi réversible du chemin de compression. À partir de ces mesures de vitesse d'interface, nous pouvons déduire la pression. Le diagnostic d'émissivité, couplé avec

la mesure de réflectivité donnée par le VISAR, fournit une estimation de la température. Les résultats sont présentés sur la figure 3. Pour le tir à haute intensité, nous pouvons observer que le quartz a été amené jusqu'à 8 Mbar et à des températures d'environ 7 000 K, des conditions jamais atteintes jusqu'à présent. De plus, les conditions de Neptune et Uranus ont été bien reproduites.

Un autre résultat de cette campagne est l'observation de légères discontinuités sur les vitesses et la température au cours de la compression. Celles-ci pourraient être associées aux croisements des transitions de phase : la fusion de la silice pour le tir à haute intensité et des

transitions solide/solide pour le tir à basse intensité. L'analyse de ces résultats nécessite des calculs *ab initio* et est en cours. Cette expérience constitue une étape importante pour les études de planétologie qui pourront se poursuivre dans le futur à pression plus élevée avec l'installation LMJ/PETAL. Le couplage avec un diagnostic de diffraction X permettrait une caractérisation plus directe des changements de phases et ainsi une forte contrainte pour les simulations *ab initio* pour qui ce type d'expérience est une source de progrès considérable.

Ce travail a été soutenu par l'ANR PLANETLAB et l'ILP. Les auteurs souhaitent remercier l'équipe technique de la LIL. ●

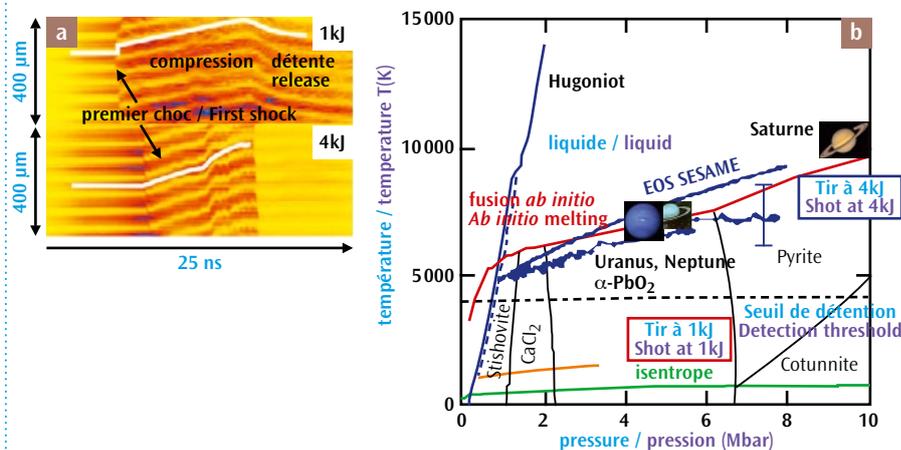


Figure 3.
 (a) : deux images VISAR typiques. La flexibilité de l'impulsion laser nous a permis de réaliser des tirs en variant la pression du premier choc en changeant l'intensité du piédestal. Ces deux tirs ont été réalisés avec une énergie de 1 et 4 kJ. Dans le cas du tir à 1 kJ nous avons pu mesurer la phase de compression (augmentation de la vitesse) ainsi que l'onde de détente (diminution de la vitesse) qui survient une fois que le laser arrête de comprimer la matière.
 (b) : chemins thermodynamiques obtenus pour ces deux tirs.
 Notons que pour le tir à 1 kJ le signal d'émissivité était en dessous du seuil de détection et la température n'a pas été mesurée, mais déduite de modèles théoriques. Pour le tir à 4 kJ, les données expérimentales sont comparées aux tables d'EOS SESAME.
 (a): two typical VISAR images. The flexibility of the laser allowed us to change the pressure of the first shock by varying the pedestal intensity. These two shots have been performed with 1 and 4 kJ. For the shot at 1 kJ, we measured both the phase compression (velocity increases) and the unloading (velocity decreases) incoming when the laser stops to compress the matter.
 (b): thermodynamical paths extracted from these two shots.
 For the shot at 1 kJ the heating signal was too low to be detected and temperature has been deduced by theory (SESAME tables). For the shot at 4 kJ, the experimental data have been compared to SESAME tables.

quasi-isentropic compression, inside a C-Au-SiO₂-LiF target. In this way, heating is minimized. A quasi-isentropic compression arises as the result of a series of sound waves of small amplitude. Experimentally, we can obtain it by using a tailored long laser pulse smoothed in time. The presence of a pedestal allows producing a weak shock before the ramp compression. Here, the laser beams were focused on the target using a phase plate with a focal spot of 800 μm. The main diagnostics were two VISAR interferometers providing the SiO₂/LiF interface velocity and a self-emission diagnostic collecting the light emitted by this interface. We show in Figure 3 two typical VISAR images obtained with 1 kJ and 4 kJ and two different intensities of the pedestal. For the two shots, we measured a fringe

jump corresponding to the arrival of the first shock followed by a smooth displacement of the fringe pattern.

By using the Doppler formula, the velocity can be extracted from the fringe shift. In the case of the shot at low energy, we measured the velocity during the compression and also the unloading wave after the end of the laser pulse. This is an indication of the quasi-reversible path which has been generated. From the velocity interface, the pressure has been deduced. Self-emission coupled to the reflectivity obtained by VISAR gives an estimate of the temperature. Results are presented in figure 3. For the shot at high intensity, we achieved a pressure of 8 Mbar and a temperature around 7000 K. This corresponds to the typical conditions of Neptune and Uranus cores.

Another result of this experimental campaign is the detection of some discontinuities in velocity and temperature during compression. These can be associated to the crossing of phase transitions: melting for the high intensity shot and a solid/solid transition at low energy. This interpretation based on *ab initio* calculations still represents a work in progress. This experiment is a fundamental step for planetology studies that will continue at even more important pressures at LMJ/PETAL facility. The simultaneous employment of a diagnostic as X-ray diffraction could provide a direct characterization of the phases and hence a strong constrains for *ab initio* simulations.

This work has been supported by the ANR PLANETLAB and ILP. The authors warmly thank the technical team of LIL. ●

Références / References

- [1] T. GUILLOT, “Interiors of giant planets inside and outside the solar system”, *Science*, **286** (5437), p. 72–77 (1999).
- [2] O. GRASSET, J. SCHNEIDER, C. SOTIN, “A Study of the Accuracy of Mass-Radius Relationships for Silicate-Rich and Ice-Rich Planets Up to 100 Earth”, *Astro. J.*, **693**, p. 722-733 (2009).
- [3] R. F. SMITH *et al.*, “Stiff Response of Aluminum under Ultrafast Shockless Compression to 110 GPa”, *Phys. Rev. Lett.*, **98**, 65701 (2007).
- [4] S. MAZEVET *et al.*, “Melting and metallization of silica in the cores of gas giants, ice giants, and super Earths”, soumis à *Phys. Rev. Lett.*

6.

S. BATON, M. KOENIG / LULI, École polytechnique, Palaiseau
D. BATANI, E. LE BEL, X. RIBEYRE / CELIA, Université Bordeaux 1-CEA-CNRS, Talence
S. BRYGOO, CH. ROUSSEAU / CEA - DAM Île-de-France
D. RAFFESTIN / CEA - Cesta

Shock ignition: alternative scheme of ICF ?

Inertial Confinement Fusion (ICF) is a promising approach to energy production that might substitute, in the long term, fission nuclear reactors. Currently, the **LLNL** in the USA with the project **NIF** attempts to demonstrate **ignition** in the laboratory. Although results are encouraging, the ultimate goal has not been yet reached. For the **NIF**, as well as the **LMJ** in France, **indirect drive** has been chosen. It uses a **hohlraum** to generate X-ray radiation that ablates and compresses the **DT** target by rocket effect. This

option appears challenging for energy production, considering laser to X-ray conversion efficiency and intricate targets that makes difficult high repetition operation necessary for fusion reactor.

Shock ignition [1], an alternative scheme appeared recently, is based on **direct drive**. This very promising scheme, with expected target gains highest than in **indirect drive** and cheaper simpler targets, relies on the dissociation of the compression and **ignition** phases. More precisely, **ignition** is obtained by an additional

contribution of energy generated by a strong convergent shock. The idea is to compress the target by focusing a large number of nanosecond laser beams followed by a sub-nanosecond high-intensity "spike" that launches a strong converging shock wave at the end of the compression (*Figure 1*).

The two key issues of this scheme are on the one hand the capacity to launch a high pressure shock above 300 Mbar through a large coronal plasma and on the other hand the laser-plasma coupling efficiency. To launch a shock at such pressure,

L'allumage par choc : schéma alternatif à la FCI ?

La **fusion par confinement inertiel (FCI)** est une des voies envisagées pour produire de l'énergie et remplacer à terme les centrales nucléaires actuelles basées sur le principe de la fission nucléaire. Actuellement, le **LLNL** aux États-Unis tente de faire la démonstration de l'**allumage** en laboratoire avec le projet **NIF**, mais les premiers résultats, même s'ils sont encourageants, ne sont pas encore concluants. L'une des options choisies par le projet **NIF**, tout comme par celui du **LMJ** en France, est l'**attaque indirecte** qui utilise une **cavité de conversion**, ou **hohlraum**, pour produire un rayonnement X qui doit ablater, puis comprimer, par effet fusée, la cible

de **DT**. Pour la production d'énergie, cette approche représente un défi en raison du rendement de conversion laser en rayonnement X et de la complexité des cibles mises en œuvre qui complique le fonctionnement à haut taux de répétition nécessaire à un réacteur à fusion.

L'**allumage par choc [1]**, un schéma alternatif apparu récemment, repose sur l'**attaque directe**. Ce schéma très prometteur, avec des gains attendus bien supérieurs à ceux de l'**attaque indirecte**, avec des cibles moins complexes et donc moins coûteuses, repose sur la dissociation des phases de compression et d'**allumage**. Dans ce cas, l'**allumage** est obtenu par un apport additionnel d'énergie fourni

par un choc fort convergent. Plus concrètement, l'implosion de la cible est réalisée de façon classique par la focalisation d'un grand nombre de faisceaux lasers dans le régime nanoseconde et le choc est généré par un « pic » laser à haute intensité générant un choc fort en fin de compression (*figure 1*).

Les deux points durs de ce schéma résident dans la capacité à lancer un choc fort d'au moins 300 Mbar à travers un large plasma coronal et dans l'efficacité du couplage laser-plasma. En effet, pour générer un choc d'une telle pression, l'intensité du « pic » laser doit être bien supérieure à 10^{15} W/cm², valeur au dessus des seuils des **instabilités paramé-**

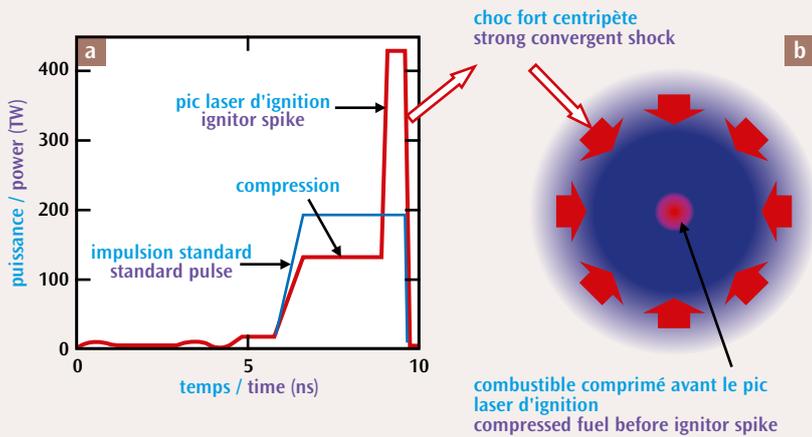


Figure 1.
 (a) : impulsions laser en fonction du temps pour le modèle standard de la FCI et celui de l'allumage par choc.
 (b) : schéma de principe de l'allumage par choc.
 (a): laser pulses vs time for standard ICF and shock ignition.
 (b): scheme of principle for shock ignition.

the intensity of the spike is expected to be a few times 10^{15} W/cm², which is largely above the thresholds of **parametric instabilities**. The main consequences of these instabilities are the back-scattered of the laser light from the target and the generation of energetic electrons that might preheat the target, thus reducing the final core compression.

Although the **LMJ** facility is designed for **indirect drive**, a scheme for **direct drive** is also considered since a few years [2], thus opening way to shock **ignition** experiments. The last experimental campaign on the **LIL** facility in February 2014, in the frame of **ILP**, has been conducted in this way. The goal of this experiment, performed by the **LULI**, the **CELIA** and the **CEA**, was to study the generation of a strong shock through a plasma having characteristic lengths in absorption and conduction regions close to those expected on the **LMJ**. For this experiment, four configurations have been used: two different time profiles, square or shaped pulse in order to test the effect of the pedestal on the shock generation (Figure 2a), and two types of target, planar or hemispherical target (Figure 2b). As the available geometry on the **LIL** is planar, the use of hemispherical targets represents

triques produites lors de l'interaction. Ces instabilités ont pour principales conséquences une perte d'énergie par rétrodiffusion du laser et la production d'électrons chauds. Ceux-ci, si leur énergie est trop forte, sont susceptibles de préchauffer la cible rendant la compression inefficace.

Bien que la future installation **LMJ** soit dimensionnée pour l'**attaque indirecte**, un schéma en attaque directe est néanmoins envisagé [2], ce qui permettrait en particulier de réaliser des expériences d'**allumage par choc**. C'est dans cette optique que la dernière campagne de l'**TLP** sur la **LIL** a été menée en février 2014. Cette expérience, réalisée en collaboration par le **LULI**, le **CELIA** et le **CEA**, avait

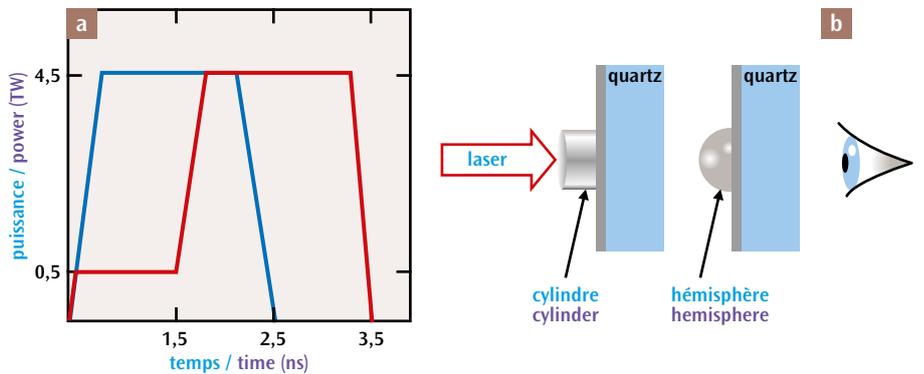


Figure 2.
 (a) : impulsions laser carrée (en bleu) et avec piédestal (en rouge) de la LIL. (b) : cibles plane et hémisphérique utilisées pour l'expérience. La fenêtre de quartz est utilisée pour observer la propagation du choc.
 (a): Square (in blue) and shaped (in red) pulses on the LIL. (b): Planar and hemispherical targets used during the experiment. The quartz window is used to observe the shock propagation.

6.

an artifact to study the effect of the ablation front curvature on the shock propagation. In this context, a preparatory experiment had been performed on **LULI2000** to validate this concept.

During the experimental campaign, twelve shots on physics have been achieved. The numerous diagnostics available on the **LIL** facility allowed to obtain information on key points of shock ignition physics. The rear side diagnostics, located at the opposite laser side, allowed to estimate the instantaneous shock velocity and temperature by viewing the shock

propagation in the quartz window. These data are essential to infer the shock pressure by using adequate **equations of state**. On the laser side, backscattering diagnostics allowed to assess the part of energy lost by scattering. Other X-ray diagnostics brought information on the hot electron population. The analysis of these experimental data, still in progress, shows an undeniable effect linked to the geometry: the shock propagates 30% faster in the hemisphere due to the convergence effect, which compensates the lateral losses linked

to the planar geometry (*Figure 3*). The effect of the pedestal is not so obvious but, nevertheless, we observe that the pre-plasma entails a slight decrease of the shock launching efficiency.

The **ablation** pressure has been estimated using the two-dimensional hydrodynamic code CHIC. It reaches 120 Mbar with the hemispherical target and around 100 Mbar with the planar one. These values represent a record in the context of **shock ignition** experiments in planar (hemispherical) geometry [3]. The data gathered during this campaign

pour but d'étudier la génération d'un choc fort dans un plasma dont les distances caractéristiques dans les zones d'absorption et de conduction sont proches de celles que l'on retrouvera sur le **LMJ**. Pour l'expérience, quatre configurations différentes ont été utilisées. Tout d'abord deux types de forme d'impulsion, impulsion carrée avec ou sans piédestal, de façon à tester l'effet du plasma créé par le piédestal sur le choc fort généré par l'impulsion carrée (*figure 2a*) et deux types de cibles : cible plane ou cible hémisphérique (*figure 2b*). En effet, la géométrie d'interaction proposée par la **LIL** étant plane, l'utilisation de cibles hémisphériques permet également, de façon artificielle, d'étudier l'effet de la courbure du front d'ablation sur la propagation du choc. Dans ce cadre, une expérience préparatoire avait été menée sur **LULI2000** pour valider ce concept.

L'expérience a bénéficié de 12 tirs de physique et des nombreux diagnostics proposés sur la **LIL** pour donner une vue d'ensemble des points clés de la physique de l'**allumage par choc**. Les diagnostics en face arrière de la cible, côté opposé au laser, ont permis d'estimer la vitesse instantanée du choc ainsi que sa température en observant au cours du temps la propagation du choc dans le quartz. Ces données sont particulièrement importantes pour en déduire la pression du choc en utilisant les **équations d'état** du matériau. Côté laser, des diagnostics de « rétrodiffusion » ont permis d'estimer la part de l'énergie laser perdue. D'autres diagnostics, dans le domaine du rayonnement X, ont apporté des informations sur la population des électrons chauds. L'analyse des données expérimentales, encore en cours, montre néanmoins un effet indéniable de la géométrie : le choc

se propage 30 % plus rapidement dans le cas de la sphère en raison de la convergence des chocs qui compense les pertes latérales inhérente à la géométrie plane (*figure 3*). En revanche, les différences liées au profilage d'impulsion (avec ou sans piédestal) sont moins marquées dans les deux cas, plan et sphérique, mais indiquent toutefois que l'existence du pré-plasma entraîne une légère perte d'efficacité sur le lancement du choc.

La pression d'ablation a été estimée à partir du code 2D hydrodynamique CHIC. Celle-ci atteint près de 120 Mbar pour la cible sphérique et un peu moins de 100 Mbar dans le cas plan, ce qui représente le record de pression dans ce type de géométrie [3] dans le contexte de l'**allumage par choc**. Les données recueillies par les différents diagnostics mis en place ont permis dans une certaine mesure de contraindre et d'améliorer le côté

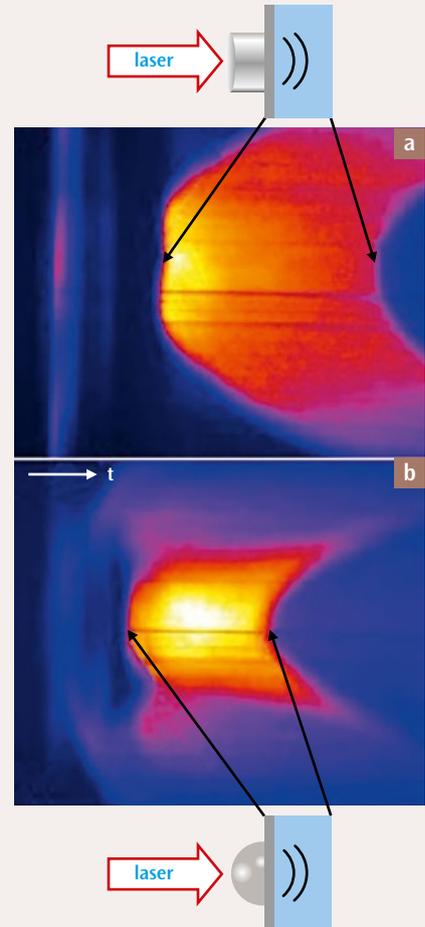
from the implemented diagnostics allowed to constraint and to improve the predictive quality of simulations, which are particularly complex in the hemispherical case. This work, still in progress, represents an undeniable experience for the following program on **shock ignition** with the perspectives of the first experiments on **LMJ-PETAL** planned in 2017.

The authors are grateful to all the **LIL** technical team. This work was supported by **ILP** and the H2020 EUROfusion Consortium within the **ToIFE project**. ●

prédicatif des simulations, particulièrement complexes dans le cas de l'hémisphère. Ce travail, toujours en cours, représente un acquis indéniable dans la suite de ce programme sur l'**allumage par choc** avec en perspectives de premières expériences sur **LMJ-PETAL** qui auront lieu à partir de 2017.

Les auteurs remercient toute l'équipe technique de la **LIL**. Ce travail a été supporté par l'**ILP** et par le consortium H2020 EUROfusion dans le cadre du **projet ToIFE**. ●

Figure 3. Images du rayonnement émis par le choc au cours de sa propagation dans le quartz recueillies en face arrière de la cible, pour la cible plane (a) et hémisphérique (b). Le temps se propage vers la droite. Le signal s'arrête à la sortie du quartz. On voit nettement que le choc débouche en sortie du quartz plus tôt en cible sphérique qu'en cible plane, montrant ainsi une vitesse plus élevée.
Time-resolved images of shock emission in quartz window for planar target (a) and hemispherical target (b). Time goes from left to right. The shock breaks out the quartz interface earlier with the hemispherical target indicating higher shock velocity in comparison with planar target.



Références / References

- [1] R. BETTI *et al.*, « Shock ignition of thermonuclear fuel with high areal density » *Phys. Rev. Lett.*, **98**, 155001 (2007).
- [2] R. RAMIS *et al.*, « Three-dimensional symmetry analysis of a direct-drive irradiation scheme for the Laser Megajoule facility », *Phys. Plasmas*, **21**, 082710 (2014).
- [3] D. BATANI *et al.*, « Physics issues for shock ignition », *Nucl. Fusion*, **54**, 054009 (2014).

Glossaire / Glossary

Organismes partenaires / Partner agencies

ANR : Agence nationale de la recherche / French National Research Agency

CEA : Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives, France / French Alternative Energies and Atomic Energy Commission.

Cesta : Centre d'études scientifiques et techniques d'Aquitaine. C'est l'un des centres de la Direction des applications militaires (DAM). Il héberge les installations laser LIL et LMJ / One of the centres within CEA French Military Applications Division, where LIL and LMJ are located.

DAM : Direction des applications militaires du CEA / French Military Applications Division within CEA.

DIF : Centre Île-de-France de la Direction des applications militaires (DAM) du CEA / One of the centres within CEA French Military Applications Division.

CELIA : Centre lasers intenses et applications UMR 5107 Université Bordeaux 1-CEA-CNRS / Center for Intense Lasers and Applications (CELIA) is a joint research unit (UMR 5107) involving a partnership between Bordeaux University (UB1), the Atomic Energy Commission (CEA) and the National Scientific Research Center (CNRS).

CPHT : Centre de Physique Théorique de l'École polytechnique / Centre of Theoretical Physics (CPHT) at Ecole polytechnique.

CNRS : Centre national de recherche scientifique / National Center for Scientific Research

DSM : Direction des sciences de la matière du CEA / Materials Sciences Division within CEA.

École polytechnique

GEPI (Galaxies, Etoiles, Physique et Instrumentation) : département de l'Observatoire de Paris / The

GEPI (Galaxies, Stars, Physics and Instrumentation) is a department of the Paris Observatory.

ILP : Institut lasers et plasmas implanté dans la zone Laseris du Barp. La mission de l'ILP est de promouvoir la recherche sur les plasmas denses et chauds et les lasers intenses. Regroupant 25 laboratoires français, cet institut est le point d'entrée pour les expériences sur le LMJ. Les premières expériences ouvertes ont été réalisées fin 2005 sur la LIL / Institute of Lasers and Plasmas located at the Laseris area of Le Barp. The ILP's task is to promote research on hot and dense plasmas and intense lasers. By gathering 25 French laboratories, this Institute is the entry point for experiments on the LMJ. The first open experiments on the LIL were performed late 2005.

IMPMC : Institut de minéralogie, de physique des matériaux et de cosmochimie rattaché à l'université Pierre et Marie Curie (UMR 7590) / Institute of Mineralogy, Materials Physics and Cosmochemistry within the UPMC (joint research unit UMR 7590).

Institut P' : unité propre du CNRS associée à l'université de Poitiers et l'ISAE-ENSMA / Research unit of CNRS associated with the University of Poitiers and ISAE-ENSMA.

INSU : Institut national des sciences de l'Univers rattaché au CNRS, Paris / National Institute for Universe Sciences within CNRS.

ISAE-ENSMA : École nationale supérieure de mécanique et d'aéronautique, école d'ingénieurs basée au Futuroscope et rattachée à l'université de Poitiers / ISAE-ENSMA is a graduate school in mechanical and aeronautical engineering located at Futuroscope and associated with the University of Poitiers.

Lebedev Physical Institute : Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia.

LLNL : Lawrence Livermore National Laboratory, USA.

LULI : Laboratoire pour l'utilisation des lasers intenses. Le LULI est une unité mixte de recherche (UMR n°7605) sous tutelle administrative du CNRS, de l'École polytechnique, du CEA et de l'UPMC / The LULI laboratory is a joint research unit (UMR n°7605) under administrative supervision of CNRS, École Polytechnique, CEA and UPMC.

LUTH : Laboratoire Univers et théories de l'Observatoire de Paris / The LUTH (Laboratory for the Universe and Theory) is a department of the Paris Observatory, and a joint research unit (UMR 8102) in partnership with the CNRS (National Center for Scientific Research) and the Paris-Diderot University.

MNHN : Musée national d'histoire naturelle, Paris / National Museum of Natural History, Paris.

Observatoire de Paris : unité mixte de recherche du CNRS (UMR 8111) et associée à l'Université Paris-Diderot / The Paris Observatory is a joint research unit (UMR 8111) of National Centre for Scientific Research (CNRS) and is associated with the Paris-Diderot University.

UPMC : Université Pierre et Marie Curie, Paris.

Université de Poitiers : University of Poitiers (France)

University of Michigan : Department of Atmospheric Oceanic and Space Sciences, USA.

Projets collaboratifs / Collaborative Projects

PLANETLAB : supporté par l'ANR, le projet PlanetLab rassemble une équipe reconnue dans le domaine des propriétés de la matière en conditions extrêmes de température et de densité pour étudier les

propriétés des alliages de fer et des silicates complexes dans les conditions rencontrées dans les intérieurs des planètes et des exoplanètes / The ANR funded PLANETLAB project assembles a world recognized team in the area of matter under extreme conditions to study the properties of metallic alloys and complex silicates at conditions encountered in Earth-like planets as well as in the core of giant planets and exoplanets.

ToIFE (Towards Inertial Fusion Energy): Projet réunissant les infrastructures laser européennes axées sur la FCI et coordonnées par le LASERLAB-Europe Infrastructure Initiative intégrée (I3) pour renforcer le rôle de leader européen dans la recherche interdisciplinaire basée sur le laser et d'améliorer la qualité du service fournie par les installations / The IFE-oriented laser infrastructures are currently coordinated through the LASERLAB-Europe Integrated Infrastructure Initiative (I3) to strengthen the European leading role in inter-disciplinary laser-based research and to improve the quality of the service provided by the facilities.

PNPS : Programme national de physique stellaire coordonné par l'INSU / National Program of Stellar Physics coordinated by INSU.

Installations laser / Laser facilities

NDLR : seules sont mentionnées ci-dessous les installations laser citées dans ce recueil / It should be noticed that only laser facilities which are mentioned in this booklet are cited hereafter.

Gekko XII : l'ILE (Institute of Laser Engineering), laboratoire de l'université d'Osaka, au Japon, utilise le laser Gekko XII, aussi bien pour des expériences en attaque directe qu'en attaque indirecte. Ce laser possède 12 faisceaux qui fournissent 30 kJ à une longueur d'onde de 1 053 nm, et 10 kJ à une longueur d'onde de 350 nm / The ILE (Institute of Laser Engineering) is one of the Osaka

University laboratories, where the Gekko XII laser facility is operating for both direct and indirect drives. 12 laser beams can deliver on target up to 30 kJ (1 053 nm) and 10 kJ at 300.

LIL : installation laser hébergée par le CEA - Cesta faisant l'objet de la collaboration entre le CEA et l'ILP et de la publication de ce recueil. Mise en fonctionnement en mars 2002, la LIL a été le laser le plus puissant d'Europe jusqu'à son arrêt définitif en février 2014. Avec tous ses faisceaux, la LIL a été le prototype de l'une des 22 chaînes du LMJ. Avec un seul faisceau, elle a produit nominalement plus de 15 kJ dans l'infrarouge et 7,5 kJ dans l'ultraviolet (351 nm) en 5,6 ns / Located at CEA - Cesta, this laser facility is the subject of the CEA/ILP collaboration and publication of this booklet. Commissioned in March 2002 the LIL has been the most powerful laser in Europe until its closure on February 2014. With its all beams, LIL has been the prototype of one of the 22 LMJ lines. The nominal energy characteristics were obtained on a single LIL beam: more than 15 kJ per beam in infrared light and 7.5 kJ in ultraviolet light (351 nm) during 5.6 ns.

LMJ : Laser Mégajoule / Megajoule Laser

Cette installation hébergée par CEA Cesta sera constituée de 176 chaînes laser. Elle est destinée au programme Simulation du CEA. Des expériences de physique des plasmas y seront par ailleurs réalisées dans le cadre de collaborations scientifiques au niveau européen / This facility is located at CEA - Cesta and consists of 176 laser beams. It is dedicated to the Simulation program of CEA. Plasma physics experiments are also planned on this facility in the frame of scientific collaborations at the European level.

LULI2000 : laser de puissance, situé au laboratoire LULI à l'École Polytechnique, destiné à la recherche en physique des plasmas à haute densité d'énergie (HEDP). Cette installation contient 2 chaînes laser pouvant délivrer jusqu'à 2 kJ à 1 053 nm en 1,5 ns (configuration nanoseconde). L'une des chaînes peut fonctionner

en régime ps en délivrant une énergie de 150 J en 1 ps (150 TW) / High power laser at LULI within Ecole polytechnique devoted to research in plasma physics at High Energy Density (HEDP). This facility contains 2 beams delivering up to 2 kJ at 1 053 nm in 1.5 ns (nanosecond configuration). One of these 2 beams can work in ps regime with a 150 J energy in 1 ps (150 TW).

NIF : National Ignition Facility

Cette installation hébergée par le Lawrence Livermore National laboratory (LLNL, USA) est constituée de 192 chaînes laser. Elle est destinée au programme Stockpile Stewardship du DOE/NNSA / This facility is located at the Lawrence Livermore National laboratory (LLNL, USA) and consists of 192 laser beams. It is dedicated to the DOE/NNSA Stockpile Stewardship program.

Omega : hébergée par l'université de Rochester, aux États-Unis, cette installation laser 60 faisceaux délivre 30 kJ en 1 ns, à une longueur d'onde de 351 nanomètres / This 60 laser beams facility, located at the University of Rochester in USA, delivers up to 30 kJ in energy in 1 ns (at 351 nm).

Termes spécialisés / Specialized terms

Allumage, ignition / Ignition : Ce phénomène est obtenu lorsque la masse surfacique et la température ionique d'un plasma fusible sont telles que l'énergie déposée par les réactions thermonucléaires l'emporte sur les pertes par rayonnement et par conduction / Ignition is obtained when fusible plasma areal density and ionic temperature stand such as the energy delivered by thermonuclear reactions outweighs the radiation and conduction losses.

Allumage par choc / Shock ignition : Schéma de FCI associant une compression du combustible par des faisceaux nanosecondes et un pic de pression lancé en fin d'impulsion laser. Ce choc, produit par un pic final d'intensité dans l'impulsion laser, conduit à une augmentation

de la température du point chaud central qui permet le démarrage des réactions de fusion / ICF scheme associating fuel compression by ns laser beams with pressure peak at the end of laser pulse. This shock, caused by laser pulse intensity final peak, leads to an increase in temperature at the central hot spot which starts up fusion reactions.

Attaque directe / Direct drive : les faisceaux lasers éclairent directement la paroi de la cible à imploser / Laser beams deliver direct irradiation to the target wall to implode.

Attaque indirecte / Indirect drive : Les faisceaux lasers éclairent la surface interne d'une cavité de forme variable, souvent cylindrique. Ils y créent un plasma émettant un rayonnement X dont la température radiative peut aller à 350 eV sur le LMJ. Ce rayonnement X éclaire la cible à imploser placée en son centre. Cette configuration favorise l'isotropie de l'implosion / Laser beams irradiate the inner surface of hohlraums in different shapes (mostly cylindrical). They create an x-ray plasma, with a radiation temperature up to 350 eV on LMJ. This x-ray irradiates the centred capsule to implode it. This configuration contributes to a better implosion uniformity.

Caméra à balayage de fente (CBF) / Streak camera : Caméra munie d'un tube électronique sous vide capable d'accélérer et de défléchir les électrons issus de sa photocathode. Son signal d'entrée est analysé le long d'une fente. Son signal de sortie est à 2 dimensions : selon un axe, il présente la coupe d'une image, et selon l'axe perpendiculaire, l'évolution dans le temps (quelques nanosecondes) de cette coupe / Camera equipped with a vacuum electronic tube designed to accelerate and deflect electrons created into a photocathode. Its input signal is analyzed along a slit. Its output signal has 2 dimensions: according to one axis it presents the lineout of an image and according to the perpendicular axis the evolution in time (few ns) of this image lineout.

Cavité de conversion / Hohlräum : Enceinte en matériau de Z élevé (Or en particulier), utilisé en attaque indirecte. Elle permet de convertir en rayonnement X les photons laser qui irradient sa surface interne / Cavity made of high-Z material (especially gold), used in indirect drive configuration. It allows converting into x-ray the laser photons that irradiate its inner surface.

Diffusion Thomson / Thomson scattering : lumière d'un laser sonde qui diffuse sur les particules du plasma (électrons et ions) / Light of a probe laser scattering on free plasma particles (electrons and ions).

Équation d'état / Equation of state (EOS) : une équation d'état est une relation entre différents paramètres physiques (appelés variables d'état) qui déterminent son état. Plus précisément, il s'agit d'une équation thermodynamique décrivant l'état de la matière dans des conditions physiques données. Une équation d'état consiste en une relation mathématique entre deux variables d'état, ou plus, caractérisant le comportement de la matière, comme la température, la pression, le volume (densité) ou l'énergie interne. Les équations d'état sont utiles pour décrire les propriétés des fluides, mélange de fluides, les solides, et même l'intérieur des milieux stellaires / An equation of state is a relation between different physical parameters, so-called state variables. More specifically, an equation of state is a thermodynamic equation describing the state of matter under a given set of physical conditions. It is a constitutive equation which provides a mathematical relationship between two or more state functions associated with the matter, such as its temperature, pressure, volume (density), or internal energy. Equations of state are useful in describing the properties of fluids, mixtures of fluids, solids, and even the interior of stars.

Fusion par confinement inertiel (FCI) / Inertial confinement fusion (ICF) : la fusion par confinement inertiel consiste à comprimer un

microballon, contenant un mélange de deutérium et de tritium, en maintenant une pression élevée sur sa paroi externe, pendant un temps de quelques nanosecondes. À la fin de l'implosion, le milieu n'est maintenu confiné que pendant un temps extrêmement court (quelques dizaines de picosecondes) au cours duquel les conditions de densité et de température sont suffisantes pour déclencher des réactions de fusion thermonucléaire. Celles-ci s'arrêtent avec l'explosion que subit ensuite l'ensemble de la cible / Inertial confinement fusion is based on compression of a microballoon containing a deuterium-tritium mixture by keeping up during a few ns high pressure on its outer surface. At the end of implosion, the medium is kept confined only for a very short time (few tens of ps) during which the density and temperature conditions are proper to start thermonuclear fusion reactions. These reactions stop with the consequent explosion inside the whole target.

Gain, cible à gain / Gain, gain target : Le gain est le rapport entre l'énergie thermonucléaire dégagée par les réactions de fusion dans la cible et l'énergie délivrée par le laser. Une cible à gain comporte une couche de deutérium-tritium solidifiée par cryogénie, qui est comprimée au cours de l'implosion et sans laquelle il ne serait pas possible d'obtenir des gains supérieurs à 1 / Gain is the ratio between the thermonuclear energy delivered in the target by fusion reactions, and energy delivered by laser. A gain target is composed of cryogenic solidified deuterium-tritium layer, that is compressed on implosion, and without which it would not be possible to reach gains above 1.

Hugoniot : connue aussi sous le nom de Rankine-Hugoniot, la courbe d'Hugoniot, tracée dans le plan pression-volume spécifique, représente les états accessibles par un matériau sous l'action d'une onde de choc, à partir des conditions ordinaires de température et de pression / Also referred as Rankine-Hugoniot curve,

the Hugoniot curve is reported in the pressure - specific volume plane, and represents the accessible states of a shocked material from temperature and pressure normal conditions.

Instabilités hydrodynamiques (Rayleigh-Taylor) / Hydrodynamic instabilities (Rayleigh-Taylor) : en FCI, au cours de la phase de compression, l'accélération est dirigée du fluide « léger » vers le fluide « lourd », c'est-à-dire du plasma de faible densité généré lors de l'ablation des couches externes de la cible vers le matériau dense des couches internes. Cette configuration rend le front d'ablation instable ; on parle d'instabilités Rayleigh-Taylor ablative. Ces instabilités vont amplifier les défauts de la cible et peuvent nuire au succès de l'expérience. Il est donc capital de comprendre et de contrôler le développement de ces instabilités / During the compression phase in ICF, the acceleration is directed from the "light" fluid towards the "heavy" fluid, i.e. the low density plasma generated during the ablation of the outer layers of the target towards the dense material of the inner layers. This configuration makes the ablation being unstable; one speaks of ablative Rayleigh-Taylor instabilities. These instabilities will amplify the defects of the target and may affect the success of the experiment. It is therefore crucial to understand and control the development of such instabilities.

Instabilités paramétriques / Parametric instabilities : le faisceau laser incident crée dans le plasma des modes propres, sous la forme de fluctuations de densité. Le faisceau incident et ces modes propres se couplent de manière instable pour donner lieu à une troisième onde qui se propage de manière résonnante en retournant vers le laser. Ces effets sont appelés rétrodiffusions stimulées. La rétrodiffusion Raman prend naissance sur un mode électronique, la rétrodiffusion Brillouin sur un mode ionique / The incident laser beam generates specific modes into the plasma, in the shape

of density fluctuations. The incident beam and specific modes are unsteadily coupled to issue a third wave that propagates back to laser in resonant mode. These effects are called stimulated backscatterings. Raman backscattering arises from an electronic mode, whereas Brillouin backscattering from an ionic mode.

Isentrope : en thermodynamique, l'isentrope est un processus au cours duquel l'entropie du système reste constante / In thermodynamics, an isentrope is a process in which the entropy of the system remains constant throughout.

SOP : Streak Optical Pyrometer.

VISAR : Velocity Interferometer System for Any Reflector.

Vélocimétrie laser par interférences (nécessite la présence d'une surface réfléchissante) / Laser interferometer velocity (requires a reflecting surface).

2005 – 2014 : 10 ANS DE
CAMPAGNE D'OUVERTURE LIL / ILP
2005 – 2014: 10 YEARS OF
LIL / ILP OPEN CAMPAIGN



Institut Lasers et Plasmas
Z.A. Laseris - 1 avenue du Médoc - 33114 Le Barp
courrier@ilp.u-bordeaux1.fr - www.ilp.u-bordeaux1.fr