

1999 - 2009

10
ans
years

de collaboration sur le
Laser Omega

of collaboration on
Omega Laser Facility



Éditorial

Les collaborations entre la France et les États-Unis dans le domaine des expériences d'interaction laser-matière remontent maintenant à plus de 20 ans avec les premiers tirs sur le laser Nova au Lawrence Livermore National Laboratory (Californie) et sur le laser Phébus au CEA de Limeil-Valenton (France). Elles ont conduit en 1994 à la signature officielle d'un accord CEA/DOE, accord qui a été renouvelé en 2004 pour 10 ans. L'arrêt de Nova, puis de Phébus, à la fin des années 1990, favorisa l'émergence d'une nouvelle génération d'installation laser au niveau mondial, dont Omega au Laboratory for Laser Energetics (LLE) de l'Université de Rochester dans l'État de New-York. Cette dernière permit la naissance d'une collaboration privilégiée entre le CEA et le DOE, puis la NNSA, pour l'étude de la physique intervenant dans l'interaction laser-matière.

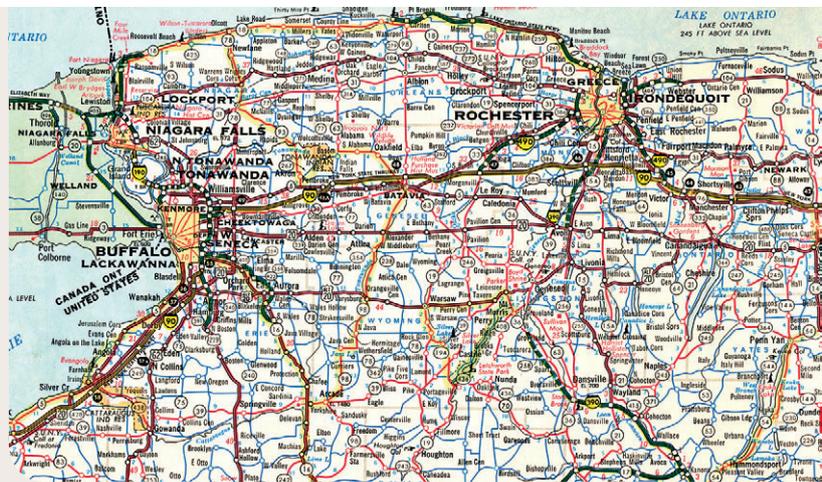
Cette collaboration bilatérale exceptionnelle se poursuit encore, préparant la mise en service du LMJ, prévue en

2014. Elle méritait, compte tenu de sa durée et de sa qualité, la publication de ce fascicule qui en célèbre ses 10 premières années et en donne un éclairage particulier sur l'ampleur des résultats obtenus durant cette période. Il permettra aussi de fournir à la manifestation organisée au LLE, dix ans jour pour jour après le premier tir réalisé sur Omega le 9 novembre 1999, un bilan scientifique qui fera référence. Il est dédié à tous les acteurs français et américains qui, depuis dix ans, se sont impliqués dans le déroulement de ces expériences communes. Depuis le premier tir réalisé sur Omega, l'utilisation de moyens propres du CEA (cibles, diagnostics et maître d'œuvre expérimentation -PI), ainsi que la qualité des équipes du LLE, ont permis d'effectuer plus de 500 tirs laser en collaboration aux résultats particulièrement riches. Le bilan de la décennie passée est d'ores et déjà un grand succès, qui comptera dans les recherches sur l'atteinte de l'ignition et la fusion par confinement inertiel par laser. L'avenir devra montrer que cette coopération bilatérale peut être poursuivie au plus grand profit de tous. ●

Executive summary

The French-US collaboration in the field of experimental laser-matter interaction physics presently dates back more than 20 years with the first shots on the Nova laser at the Lawrence Livermore National Laboratory (CA, USA), and the Phebus laser at the Limeil-Valenton CEA Centre in France. They led to the signing of a CEA/DOE agreement in 1994 that was renewed for another ten years in 2004. The shutdown of Nova, and subsequently of Phebus in the late 1990's, has given rise to the use of a new generation of facilities on a worldwide scale, such as the Omega Laser Facility at the LLE (Laboratory for Laser Energetics) at the University of Rochester in New York State. The latter has led to effective collaboration between CEA and DOE, and subsequently NNSA, in the study of physics of laser-matter interactions.

This outstanding two-way collaboration continues in preparation for an operational LMJ for 2014. Due to the longevity and excellence of this collaboration this booklet honors the first 10 years of the use of the Omega laser Facility and highlights some of the results collected during these years. This booklet provides a reference point 10 years to the day after the first collaborative shot on Omega (November 9, 1999) for the



scientific evaluation of this international bilateral collaboration. This is dedicated to all the French and US participants, who have been involved in this joint effort for ten years. Since the first shot on Omega, more than 500 very fruitful joint laser shots have been performed, thanks to the use of resources specific to CEA (targets, diagnostics, and principal investigators), and LLE teams. The results of the past decade have been very successful and will significantly contribute to achieving ignition in laser inertial confinement fusion. The future will show that such a bilateral cooperation can be pursued for the best benefit of each participant. ●

10 ans de collaboration sur le Laser Omega years of collaboration on Omega Laser Facility

| | | |
|-----------|---|----|
| | Editorial / Executive summary T. MASSARD, R.L. MC CRORY | |
| 1 | La genèse (1997-1998) / Origin : 1997-1998 | 2 |
| 2 | Les permanents et le correspondant du CEA au LLE The CEA Permanent Team and the CEA Delegate at LLE J.-L. BOURGADE, N. DAGUE, J. BEULLIER, P. BEAUVAIS, P. LEBORGNE, J. TIDU, T. SOMERLINCK | 4 |
| 3 | Le programme expérimental français au LLE The CEA Experimental Program at LLE C. CHERFILS, J.-L. MIQUEL, E. DATTLO, J. EBRARDT, P.-A. HOLSTEIN, A. JOLAS, D. JURASZEK, D. MORLET | 6 |
| 4 | Expériences d'interaction laser-plasma sur Omega Laser-Plasma Interaction Studies on Omega S. DEPIERREUX, P. LOISEAU, F. PHILIPPE, C. ROUSSEAU, D. TEYCHENNÉ, W. SEKA, H. A. BALDIS, R.E. BAHR, S.H. GLENZER, J.D. MOODY, R.K. KIRKWOOD, D.H. FROULA | 8 |
| 5 | Expériences de conversion X X-ray Conversion Experiments J.-P. JADAUD, D. BABONNEAU, J.-L. BOURGADE, R. BOTREL, P. DI NICOLA, F. GIRARD, L. LOURS, M.-C. MONTEIL, P. RENAUDIN, B. VILLETTE, F. WAGON, E. DEWALD, C.S. SORCE, R.E. TURNER, R.E. BAHR, J.P. KNAUER, B. YAAKOBI | 10 |
| 6 | Les diagnostics X du CEA sur Omega CEA X-Ray Diagnostics on Omega <ul style="list-style-type: none"> ■ Comparaison DMX / Dante Comparison DMX Versus Dante on Omega Shots B. VILLETTE, J.L. BOURGADE, P. STEMMLER, J.-P. JADAUD, O.L. LANDEN, R.E. TURNER, C.S. SORCE, G. PIEN, T. HINTERMAN ■ Imagerie X à haute résolution (HRXI) High Resolution X-ray Imager (HRXI) P. TROUSSEL, J.-L. BOURGADE, B. ANGELIER, J. FARIAU, A. CASNER, G. HUSER, D. GONTIER, C. ZUBER, T.C. SANGSTER, G. PIEN, P.A. JAANIMAGI, R.E. BAHR, W.J. ARMSTRONG, J. DEWANDEL, C.Y. COTÉ, S. MAGNAN | 12 |
| 7 | Expériences de symétrie d'implosion Irradiation Symmetry Experiments M.-C. MONTEIL, V. TASSIN, S. LAFITTE, F. PHILIPPE, J.-P. JADAUD, G. HUSER, P. SEYTOR, J. BASTIAN, L. LOURS, A. RICHARD, M. NAUDY, P. AMENDT, L. SUTER, W.J. ARMSTRONG, R.E. BAHR, M. BONINO, V. GLEBOV, G. PIEN, S.P. REGAN, W. SEKA, C.S. SORCE, S. STAGNITTO, C. STOECKL, K. THORP, J. WYATT | 14 |
| 8 | La cavité rugby Rugby Shaped Hohlräume M. VANDENBOOMGAERDE, F. PHILIPPE, J. BASTIAN, T. CAILLAUD, A. CASNER, G. HUSER, J.-P. JADAUD, S. LAFITTE, O. LANDOAS, S. LIBERATORE, G. MALINIÉ, M.-C. MONTEIL, P. SEYTOR, P. AMENDT, H.S. PARK, H. ROBEY, C.S. SORCE, R. PETRASSO, C.K. LI, F. SEGUIN, V. GLEBOV, G. PIEN, C. STOECKL, K. THORP | 16 |
| 9 | L'imagerie neutronique sur Omega Neutron Imaging (NIS) on Omega L. DISDIER, O. LANDOAS, A. ROUYER, J.-L. BOURGADE, A. FEDOTOFF, I. THFOIN, T. CAILLAUD, V. YU. GLEBOV, C. STOECKL, W.J. ARMSTRONG, T.C. SANGSTER, F.J. MARSHALL, R.A. LERCHE, D.C. WILSON | 18 |
| 10 | Mesures neutroniques sur Omega Neutron Measurements on Omega <ul style="list-style-type: none"> ■ Mesures du nombre de neutrons Neutron yield measurements O. LANDOAS, M. BRIAT, B. ROSSÉ, B. BRULLOT, L. DISDIER, P. BERGONZO, D. TROMSON, H. HAMRITA, V. YU. GLEBOV, T.C. SANGSTER ■ DEMIN : un spectromètre neutrons pour la mesure de $\langle\rho R\rangle$ DEMIN : a neutron spectrometer for $\langle\rho R\rangle$ measurement M. HOURY, B. ROSSÉ, O. LANDOAS, E. DELAGNES, PH. LEGOU, I. GIOMATARIS, V. YU. GLEBOV, T. C. SANGSTER | 20 |
| 11 | Les études d'instabilités hydrodynamiques Hydrodynamic Instabilities Studies A. CASNER, D. GALMICHE, G. HUSER, J.-P. JADAUD, S. LIBERATORE, L. MASSE, M. VANDENBOOMGAERDE, K. THORP, G. PIEN, S. STAGNITTO, M. BONINO, R.E. BAHR, C.S. SORCE, V. SMALYUK | 22 |
| 12 | Sources X Multi-keV sur Omega de 2002 à 2010 : des feuilles pré-explosées aux cavités tapissées de métal Multi-keV X Sources on Omega from 2002 to 2010: from pre-exploded foils to metal-lined hohlraums M. PRIMOUT, F. GIRARD, D. BABONNEAU, L. JACQUET, Ph. STEMMLER, B. VILLETTE, J.-P. JADAUD, M. NAUDY, S. DEPIERREUX, J.-L. ULMER, P. DI-NICOLA, F. DURUT, K.B. FOURNIER, L.J. SUTER, O.L. LANDEN, S.H. GLENZER, M.C. MILLER, R.L. KAUFFMAN, C.A. BACK, C. CONSTANTIN, J.F. DAVIS | 24 |
| 13 | La préparation et les premières expériences sur Omega EP (2008-2009) Omega EP Preparation and First Shots (2008-2009) C. COURTOIS, A. COMPANT LA FONTAINE, R. EDWARDS, O. LANDOAS, J.-L. BOURGADE, J. GAZAVE, G. PIEN, D. MASTROSIMONE, C. AEDY, E. LEFEBVRE, C. STOECKL | 26 |
| 14 | Omega EP et Pétal préparent HIPER Omega EP and Petal towards HIPER D.D. MEYERHOFER, E. LEFEBVRE | 28 |
| 15 | Mesurer les propriétés des mélanges hydrogène/hélium dans les intérieurs planétaires Properties of Hydrogen / Helium Mixtures under Deep Planetary Conditions S. BRYGOO, P. LOUBEYRE, J. EGGERT, P. CELLIERIS, G. COLLINS, S. MC WILLIAMS, D. SPAULDING, R. JEANLOZ, C.S. SORCE, T. BOEHLY | 30 |
| 16 | Études de vulnérabilités des diagnostics sous rayonnements nucléaires Diagnostics Vulnerability Studies under Nuclear Radiations J.-L. BOURGADE, J. RAIMBOURG, J. BAGGIO, H.-P. JACQUET, J.L. LERAY, S. DARBON, J.-C. GOMME, L. DISDIER, S. GIRARD, S. BAZZOLI, J. GAZAVE, M. BARBOTIN, D. BRÉBION, P. JAANIMAGI, V. GLEBOV, G. PIEN, C.T. SANGSTER, C. STOECKL, W. SHMAYDA, R.A. LERCHE | 32 |
| 17 | Préparation et acquisition des expériences Experiments Planning and Acquisition <ul style="list-style-type: none"> ■ Modélisation CAO de l'installation Omega et des cibles CEA Omega facility and CEA targets CAD modelling J.-L. ULMER, J.-L. BOURGADE, R. MARONI, F. AUBARD, G. PIEN, W.J. ARMSTRONG, M. FOX, J. MATHER ■ Système d'acquisition de mesures du CEA pour les expériences sur Omega CEA Data Acquisition System for Omega experiments M. BARBOTIN, S. CHICHE, D. BRÉBION, L. DISDIER, J.-L. BOURGADE, O. LANDOAS, J. DOUBLIER, T. HINTERMAN, G. PIEN, T. BRANCATO, B. ROMBAUT, J. WYATT, B. KINGERY, A. SHECHTER | 34 |
| 18 | Développements des cibles CEA pour Omega CEA Target Developments for Omega R. COLLIER, O. LEGAIE, S. BEDNARCZYK, R. BOTREL, O. BRETON, A. CHOUX, F. DURUT, C. DAUTEUIL, L. JEANNOT, G. LEGAY, B. RENEAUME, M. THÉOBALD, M. BONINO, D. HARDING, J. FOOKS | 36 |
| 19 | Assemblage, contrôle et mise en œuvre des cibles standards pour Omega Assembly, Metrology, and Delivery of Standard Targets for Omega Laser Facility P. DI-NICOLA, S. BOYER, A. LAVILLE GEAY, V. RAFFIN, F. SEGUINEAU, M. BONINO, D. HARDING, J. FOOKS | 38 |
| 20 | Fabrication et métrologie de miroirs et de polariseurs hautes performances pour le LMJ Fabrication and Metrology of High Performance Mirrors and Polarizers for LMJ H. FLOCH, A. RIGATTI, E. LAVASTRE | 40 |
| | Glossaire / Glossary | 42 |
| | Références / References | 45 |
| | Album photos / Pictures book | 46 |

Origin : 1997-1998

French-US collaboration in the field of high-power lasers has a long tradition. In the early eighties, exchanges in the fields of physics and high-power laser technology have opened **Nova** at **LLNL** and **Phebus** at **CEA Limeil-Valenton** for collaborative research. An experimental team of physicists from **LLNL** visited **Phebus** and together with their French colleagues performed a successful series of experiments on X-ray lasers produced by collisional excitation in plasmas. One of the US team members was Christopher Keane who later actively contributed, in the course of his official duties, to the French-US collaboration. In this process the **Department of Energy (DOE)** offered to extend these exchanges on **ICF** experiments including experiments on **Nova** in close cooperation with **LLNL** and **LANL**. For

several years, a numbers of collaborative results were obtained in the field of laser plasma interactions and **indirect drive** implosion physics. These results have contributed to showing that **ignition** was feasible in megajoule-class lasers, and therefore, the **NIF** and **LMJ** programs could be started.

With **NIF** and **LMJ** in preparation, the shutdown of **Phebus** and **Nova** in 1999 raised the issue of maintaining competent teams and facilities aimed at carrying out studies to finalize the design of future targets to reach **ignition**. In the US, the response was to use the **Omega** Laser Facility. As **DOE** wished to maintain collaboration with **CEA** beyond the planned shutdown of **Nova**, they offered to continue joint experiments at **LLE**. In the first half of 1997,

Dr. Robin Staffin and Dr. Victor Reis from the **DOE** visited **CEA - DAM Île-de-France** at Bruyères-le-Châtel to define the basis of the new agreement. Michel de Gliniasty and Robert McCrory, as directors, met at the **University of Rochester** on 11 and 12 of September. For these preliminary talks, Michel de Gliniasty was accompanied by his deputy director Jacques Tassart and by Alain Jolas and Denis Juraszek as experimental teams managers. They were warmly welcomed and profited from a clear briefing, a detailed visit and a useful user's guide of the **Omega** facility (*Fig. 1*). The return trip carried a huge plastic sphere (*Fig. 2*) showing the different beams and view ports of the **Omega** experimental chamber. Further exchanges followed, after which it was agreed that in 1998, **CEA** physicists would become familiar with the facility by participating in US experiments. Subsequently they became involved directly by installing new dia-

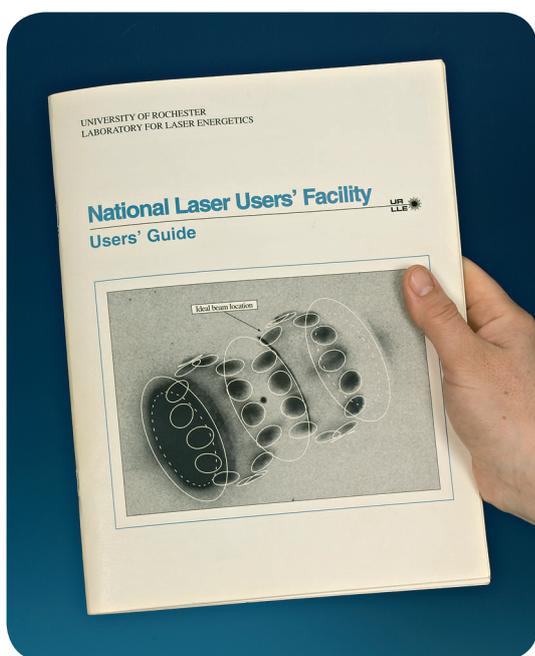


Fig. 1 : Le premier guide de l'installation Omega (édition de janvier 1997).
First Omega facility user's guide (edited in January 1997).

La genèse : 1997-1998

La collaboration entre les États-Unis et la France dans le domaine des lasers de puissance s'inscrit dans une longue tradition. Au début des années 80, les échanges au niveau de la physique et de la technologie de ces lasers, se sont concrétisés par la mise en service de **Nova** au **LLNL** et de **Phébus** au centre **CEA de Limeil-Valenton**. Dans le domaine de l'expérimentation, **Phébus** accueillera quelques années plus tard une équipe de physiciens du **LLNL** qui réaliseront, en collaboration avec leurs collègues français, une série fructueuse d'expériences sur le laser X produit par excitation collisionnelle dans des plasmas. L'équipe américaine comptait

“ Le DOE, souhaitant que la collaboration avec le CEA perdure au-delà de l'arrêt programmé de Nova, a proposé de poursuivre les expériences communes au LLE ”

gnostics (> 1999) and fielding their own experiments. In September 1998, the terms and conditions of the new agreement were endorsed by both co-presidents, David Crandall for the **DOE**, and Alain Delpuech for the **CEA**. ●

“ The DOE expressed the desire to continue its collaboration with the CEA beyond the planned shutdown of Nova through joint experiments at LLE ”

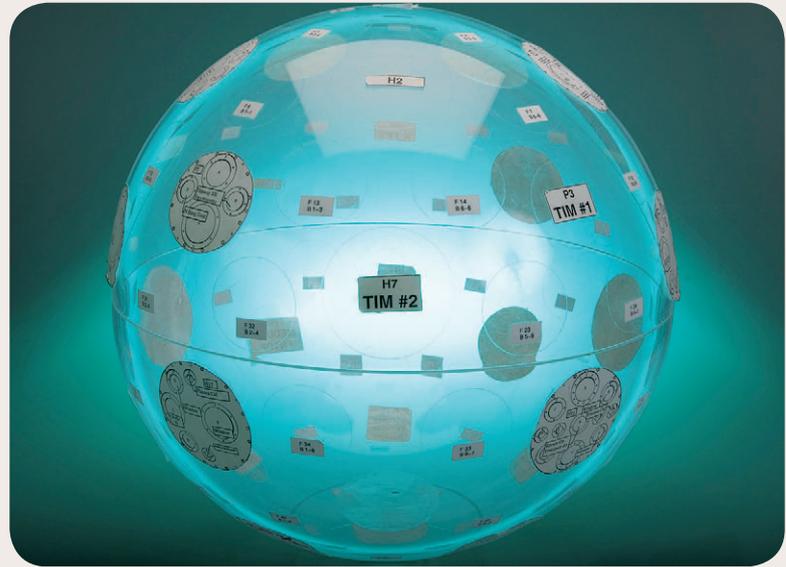


Fig. 2 : La « sphère » : maquette en plastique de la chambre d'expérience d'Omega (diamètre ~40 cm).
The "sphere": Omega target chamber plastic mock-up (diameter ~40 cm).

en particulier Christopher Keane qui, par la suite, dans d'autres fonctions, contribuera activement à la collaboration entre les deux pays. Celle-ci a franchi une nouvelle étape en 1994, lorsque le **DOE** a proposé au **CEA** d'élargir les échanges au domaine des expériences de **FCI** et de mener, en liaison étroite avec les équipes du **LLNL** et du **LANL**, des expériences sur **Nova**. Dans les années qui ont suivi, de nombreux résultats ont été acquis dans le domaine de l'interaction laser-plasma, de la physique de l'implosion en **attaque indirecte**. Ces résultats ont largement contribué à démontrer que l'**ignition** et la **combustion** pouvaient être obtenues grâce à des lasers de classe mégajoule et donc, par là, au démarrage des projets **NIF** et **LMJ**.

La préparation du **NIF** et du **LMJ** devant conduire à l'arrêt des installations **Phébus** et **Nova** en 1999, la question du maintien de la compétence des équipes

s'est posée, ainsi que celle d'une installation avec laquelle poursuivre les études destinées à finaliser le design des futures cibles pour l'atteinte de l'**ignition**. Côté US, les réponses à ces questions étaient apportées par le laser **Omega**. Le **DOE**, souhaitant que la collaboration avec le **CEA** perdure au-delà de l'arrêt programmé de **Nova**, a proposé de poursuivre les expériences communes au **LLE**. Le **CEA - DAM Île-de-France** a ainsi reçu, sur son site de Bruyères-le-Châtel, les visites du Dr. Robin Staffin et du Dr. Victor Reis du **DOE** au premier semestre 1997 pour définir les principes du nouvel accord. Les directeurs, Michel de Gliniasty et Robert Mc Crory, ont convenu d'une visite à l'**Université de Rochester** qui a eu lieu les 11 et 12 septembre. Pour cette prise de contact, Michel de Gliniasty était accompagné de son adjoint Jacques Tassart, d'Alain Jolas et de Denis Juraszek responsables des équipes expérimentales. Ils ont été

chaleureusement accueillis et ils ont pu appréhender les possibilités de l'installation **Omega** grâce à des présentations d'une grande clarté, une visite approfondie ainsi qu'un guide très utile de l'installation (Fig. 1). Le retour s'est fait en compagnie d'une grande sphère en plastique où étaient positionnés les différents faisceaux et hublots de la chambre d'expériences **Omega** (Fig. 2). D'autres échanges ont suivi, à la suite desquels, il a été convenu que, durant l'année 1998, les physiciens du **CEA** se familiariseraient avec l'installation **Omega** en suivant des expériences américaines et s'impliqueraient directement à partir de 1999 en installant de nouveaux diagnostics et en participant directement à la réalisation d'expériences. Les termes et les modalités du nouvel accord ont été avertisés en septembre 1998 par les deux coprésidents David Crandall (**DOE**) et Alain Delpuech (**CEA**). ●



Fig. 1 : Entrée principale du LLE sous la neige hivernale (décembre 2001).
Main entrance of LLE during winter period (December 2001).

Les permanents et le correspondant du CEA au LLE

Dès 1998, et pour compenser l'arrêt de **Phébus** tout en attendant le démarrage de la **LIL**, une collaboration accrue sur l'installation **Omega** s'organise *via* les accords **CEA/DOE**. Pour assurer le succès de ces premières expériences laser à 6000 km de la France et pour « compenser » leur coût pour l'installation, le **CEA** délègue sur place en 1999, 4 agents formés sur **Phébus** à la conduite des expériences : N. Dague comme premier « encadrant » et 3 techniciens (P. Leborgne, P. Beauvais et J. Tidu). Outre les épouses, trois enfants et un bébé feront également le voyage. L'intégration est facilitée par une réelle volonté de part et d'autre d'échanger sur tous les sujets, scientifiques ou techniques naturellement, mais également sur des plans plus personnels comme pour les subtilités de l'anglais que les enfants sont les plus rapides à intégrer. Tous travaillent évidemment au contact direct des expérimentations.

The CEA Permanent Team and the CEA Delegate at LLE

To compensate for the shut-down of the **Phebus laser** in 1998 and before the startup of **LIL**, the increased collaboration on **Omega** began through **CEA/DOE** agreements. To assure the success of the first laser experiments to be performed at 6,000 km from France and balance the setup costs, the **CEA** sent four highly qualified **Phebus** experts to **LLE**: N. Dague as first “chief engineer”, and three technicians (P. Leborgne, P. Beauvais and J. Tidu) accompanied by their wives, three children and a baby. The integration was made easier thanks to the goodwill on both sides to exchange ideas on any subject - scientific, technical, and also

more domestic such as the subtleties of the English language that children are quickest to grasp. All of them worked in direct contact with the experimental devices.

As the laser beams were not covered they were confined in a huge clean room. Before starting, the team had to study all the safety rules and operating instructions thoroughly. Regulation training was very strict and ended in pass/fail tests under the friendly and Francophile but resolute authority of the “Captain” (named Steve Loucks, former captain on an US Nuclear Attack Submarine).

As for J. Tidu, he used to tame spiders in order to get silks that were used to support targets produced in the “Target Lab”. When familiar with their parts as EST (Experimental System Technicians) and ESO (Experimental Systems Operators), the French technicians helped with the development of the first CEA diagnostics on **Omega** (**DMX**, **NIS**). Despite harsh weather (*Fig. 1*), fortunately counterbalanced by the proximity of the Niagara Falls they could visit from time to time (*Fig. 2*), three of them stayed on one more year.

J. Beullier became the team manager, at times supported by one technician

Les lignes laser d'**Omega** ne sont pas tubées ; elles doivent donc être enfermées dans une vaste salle blanche. Les risques laser sont décuplés. Avant de pouvoir opérer, il faut connaître les règles de sécurité, les consignes d'exploitation. La formation réglementaire est très rigoureuse et se conclut par des examens à renouveler périodiquement sous la « férule » amicale, francophile mais ferme du « Captain » (Steve Loucks ancien commandant sous-marinier de sous-marin nucléaire d'attaque US).

Pour sa part, J. Tidu dompte des araignées (pour leur soutirer le fil qui sert à arrimer les cibles) et est reconnu dans tout le « labo cible ». Leurs rôles d'EST - Experimental System Technician et puis d'ESO (Operator) intégrés, ils peuvent aider au déploiement des premiers diagnostics du **CEA** sur **Omega** (DMX puis NIS). Malgré le climat rigoureux (Fig. 1)

mais favorisé par les visites régulières des chutes du Niagara proches (Fig. 2), 3 agents poursuivront l'aventure une année supplémentaire.

Le pilotage sera confié à J. Beuiller. Il restera jusqu'en 2004, un temps secondé par un seul technicien (T. Somerlinck), pour enfin jouir d'une retraite bien méritée. Le temps des équipes permanentes étant révolu, leurs compétences acquises ayant été mises à profit lors de la mise en service de la **LIL**, le **CEA** maintient et même accroît son effort au **LLE** avec actuellement 4,5 jours d'expériences par an payées dont ½ journée sur la nouvelle installation **Omega-EP** opérationnelle depuis fin 2008. Un correspondant privilégié et présent depuis les premières expériences de 1999, J.-L. Bourgade, basé au **CEA-DIF**, poursuit la tradition depuis mai 2004, avec une présence sur site très significative (5 à 6 séjours de 1 à 2

semaines par an). Il a ainsi pu explorer tous les « hubs » des compagnies aériennes desservant Rochester et d'en tester leur fiabilité lors des conditions hivernales. Il a du aussi découvrir tous les méandres douaniers des expéditions de matériels. Malgré toutes ces contraintes, **Omega** restera un bon souvenir pour chacun et pour longtemps l'une des installations laser les plus propices à la préparation des futures expériences du **NIF** ou du **LMJ**. ●

“ Le CEA délègue sur place en 1999, 4 agents formés sur Phébus à la conduite des expériences ”

“ The CEA mission in 1999 four experts, highly qualified on Phebus ”

Fig. 2 : Les chutes américaines de Niagara falls (décembre 2001).
American falls Niagara falls (December 2001).



(T. Somerlinck). He remained appointed until 2004, when he returned to France for his retirement. The days of permanent French teams at **LLE** are now over but the benefit of their experience at **LLE** has been applied during the commissioning of **LIL**. **CEA** continues to support and has even increased its payment for shot time for 4 to 5 days per year dedicated to experiments, of which ½ of a

day is reserved for **Omega-EP**, which has been operational since the end of 2008. Since the first experiments in 1999, J.-L. Bourgade has been the permanent **CEA** delegate based at **CEA-DIF**. Starting in May 2004, he has typically visited **LLE** 5 or 6 times a year for 1 or 2-weeks at a time. This has afforded him the opportunity to explore all the “hubs” of the airlines connecting to Rochester, and try

their reliability under winter conditions. He has become an expert on US and French customs intricacies for air freighting equipment. In spite of all those constraints, **Omega** will remain a fond memory for all us, and for a long time to come **Omega** will remain one of the best facilities for the preparation for **NIF** and **LMJ** experiments. ●

The CEA Experimental Program at LLE

The CEA experimental program on **Omega** has replaced that on **Nova** in the frame work of the **CEA/NNSA** collaboration for the preparation of **ignition** on the **Laser Megajoule**. It has extended the topics started on **Nova**, such as laser-plasma interaction, x-ray conversion, implosion symmetry and hydrodynamic instabilities, continually growing larger during these ten years of collaboration (Fig. 1). The first experiments were carried out with US targets and diagnostics, allowing **CEA**, after the closing of **Phebus**, to continue to train our teams on a big scale in target fabrication, validation of diagnostics, and the control of experiments

on a large laser facility. One can cite, for example, the first x-ray conversion shot conducted with 60 **direct drive** beams on November 9, 1999 [*Jad10*] on gold and copper spheres provided by the **CEA**, and diagnosed by **DMX** and **Dante**. **CEA** now provides more complex targets such as gas-filled **hohlraums** surrounding a micro-balloon filled with a mixture of argon and D_2 [*Col10*]. On **Omega**, 40 beams provide **hohlraum** irradiation for **indirectly driven implosion** experiments [*Mon10*] with a multi-cone irradiation geometry representative of the **LMJ** configuration.

Part of these experiments are now carried out on the **LIL**, the **LMJ** laser prototype, as laser plasma interaction campaigns, to validate specific concepts, while new topics are studied on **Omega**. Some of them have been and continue to be treated as "ride-along shots" on many other campaigns: vulnerability studies, optimization of x-ray sources, tuning of nuclear diagnostics including neutron imaging [*Dis10*]. The establishment over several years of an experimental platform for hydrodynamic instability studies has allowed **CEA** to scrutinize the hydrodynamic stability of **CHGe**, the nominal **ablator** for the **LMJ** capsules. Recent campaigns have experimentally confirmed the stabilizing character of a laminated **ablator**, predicted by the theory of the **ablation** front instability and numerical simulations [*Cas10-1*]. **Omega** has been used to test the rugby-shaped **hohlraum** [*Van10*] concept. This

Le programme expérimental français au LLE

Le programme expérimental du CEA sur le laser **Omega** fait suite aux expériences réalisées sur **Nova** dans le cadre de la collaboration **CEA/NNSA** pour la préparation de l'atteinte de l'**ignition** sur le **LMJ**. Il a permis de poursuivre les thématiques importantes pour le programme **LMJ** commencées sur **Nova**, comme les expériences d'interaction laser-plasma, de conversion X, de symétrie d'implosion et d'instabilités hydrodynamiques, tout en prenant de l'ampleur au cours de ces dix années de collaboration (Fig. 1). Si les premières expériences ont été réalisées avec des cibles et des diagnostics américains, cette collaboration

nous a permis, à l'arrêt de **Phébus**, de continuer à former nos équipes en vraie grandeur, sur la fabrication des cibles, la validation de diagnostics, et la maîtrise d'expérimentations sur une grande installation. Citons ainsi le premier tir de conversion X avec comparaison de **DMX** et **Dante** menée le 9 novembre 1999 [*Jad10*] réalisées en **attaque directe**, grâce aux 60 faisceaux, sur des sphères d'or et de cuivre fournies par le **CEA**. Aujourd'hui, les cibles réalisées sont plus complexes, comme des cavités à gaz avec un microballon rempli d'un mélange de D_2 et d'argon [*Col10*]. La configuration laser de **Omega**, avec 40 faisceaux de

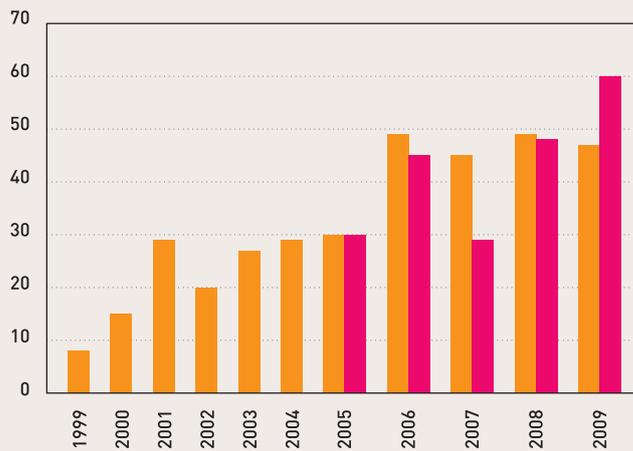
“ Il a permis de poursuivre les thématiques importantes pour le programme LMJ déjà étudiées sur Nova ”

chauffage en **attaque indirecte**, nous a de plus permis de réaliser des expériences d'implosion en cavité [*Mon10*] avec une irradiation multi-cônes, représentative d'une configuration **LMJ**.

Certaines expériences de validation de concepts sont maintenant réalisées sur la **LIL**, laser prototype du **LMJ**, et de nouveaux thèmes sont traités sur **Omega**. Certains d'entre eux ont pu et continuent à être traités en «passager» sur de nombreuses campagnes: études de vulnérabilité, optimisation de sources de radiographie, mise au point de diagnostics nucléaires dont l'imagerie neutronique [*Dis10*].

“ It has extended the important topics for LMJ program already studied on Nova ”

is now the nominal **hohlraum** of the **LMJ ignition** target. This experimental program was enriched by collaborations with many teams, culminating in 2009 with well diagnosed implosion experiments in **indirect drive** conducted in collaboration with **LLNL** and **MIT**, highlighting the interest of a rugby-shaped **hohlraum**. The decade ended with new perspectives through the installation of **Omega-EP** which provides access to a ps regime of high energy. Multi-MeV X-source experiments conducted in collaboration with **AWE** enable a major advance in studies of laser-driven flash radiography that can be used to diagnose fusion targets [Cou10]. ●



■ Nombre de tirs CEA / CEA's shots number
■ Nombre de tirs collaboration / Collaboration's shots number

Fig. 1 : Évolution du nombre de tirs CEA et de collaboration (données disponibles à partir de 2005) réalisés durant les 10 années. Le nombre de tirs CEA a augmenté jusqu'en 2006, et s'est stabilisé depuis ; les collaborations sont dépendantes des thématiques et fluctuent d'une année sur l'autre.
Evolution of the number of CEA and collaborative shots (data available from 2005) during the 10 years. The number of shots increased until 2006 and has since stabilized ; the exact collaboration depends on the current topics and fluctuates from year to year.

La mise en place sur plusieurs années d'une plateforme expérimentale pour les études d'instabilités hydrodynamiques nous a permis d'étudier la stabilité hydrodynamique du **CHGe**, **ablateur** nominal des capsules **LMJ**. Les dernières campagnes ont permis en particulier de confirmer expérimentalement le caractère stabilisant d'un feuilletage de l'**ablateur**, prédit par la théorie de l'instabilité du front d'**ablation** et les simulations numériques [Cas10-1]. C'est aussi sur **Omega** que nous avons testé notre dimensionnement de cible utilisant une cavité rugby [Van10], qui est maintenant la cavité nominale de la cible d'**ignition** pour le **LMJ**. Ce programme expérimental s'est enrichi de collaborations avec de nombreuses équipes, culminant en 2009 avec des expériences d'implosion en **attaque indirecte** très instrumentées réalisées en collaboration avec le **LLNL** et le **MIT**, mettant en évidence l'intérêt énergétique d'une cavité rugby.



■ Nombre de campagnes CEA / Number of CEA's campaigns
■ Nombre de collaborations / Number of collaborations

① 1^{ère} image neutron en attaque directe / 1st direct drive neutron image
② 1^{ère} cavité CEA / 1st CEA hohlraum
③ 1^{ère} cavité rugby / 1st rugby shaped hohlraum
④ 1^{er} spectre des neutrons secondaires avec cible cryogénique / 1st cryogenic target neutron spectrum
⑤ 1^{ère} cavité à gaz CEA / 1st CEA gaz hohlraum
⑥ Record et 1^{ère} image neutron en attaque indirecte / Indirect drive record and 1st neutron image / 1^{ère} radiographie PW / 1st PW radiography

Fig. 2 : Évolution du nombre de campagnes CEA et de collaborations, avec les principaux faits marquants. À partir de 2004, le programme CEA a favorisé les campagnes d'une journée entière au détriment des demi-journées, d'où une diminution du nombre de campagnes à nombre de tirs constant.
Evolution of the number of CEA and collaborations campaigns, together with main milestones. Since 2004, the CEA program has promoted full-day campaigns at the expense of half-days, thus reducing the number of campaigns for the same number of shots.

Cette décennie s'achève sur de nouvelles perspectives, grâce à l'installation **Omega-EP** donnant accès à un régime picoseconde (ps) à forte énergie. Les expériences de sources X Multi-MeV réalisées en collaboration avec l'**AWE** permettent une avancée importante dans les études de radiographie éclair par laser qui pourra être utilisée pour diagnostiquer des cibles de fusion [Cou10]. ●

S. DEPIERREUX, P. LOISEAU, F. PHILIPPE,
C. ROUSSEAU, D. TEYCHENNÉ
CEA - DAM - Île-de-France

W. SEKA, R.E. BAHR
University of Rochester - LLE

H.A. BALDIS
University of California, Davis

S.H. GLENZER, J.D. MOODY, R.K. KIRKWOOD, D.H. FROULA
LLNL

La première campagne CEA d'interaction laser-plasma a été réalisée sur Omega en Novembre 2002 avec pour principal objectif de comprendre la croissance et la saturation de l'instabilité de diffusion Raman stimulée (SRS) dans des plasmas de haute température. Cette première expérience, conduite par le CEA, a fait suite à une première collaboration entre les deux laboratoires (CEA et LLE) sur ce sujet plus tôt en 2002, rendue possible par la chaleureuse invitation de Wolf Seka à participer à ses expériences au LLE. En complément des nombreuses mesures de rétrodiffusion Raman réalisées en « gasbag » par le groupe interaction du LLNL, une nouvelle configuration, permettant de sonder les ondes plasma électroniques stimulées par l'instabilité de rétrodif-

Expériences d'interaction laser-plasma sur Omega

fusion Raman à l'aide de la diffusion Thomson, a été définie et testée avec succès sur Omega lors de cette première campagne CEA de Novembre 2002. Ce diagnostic repose sur la diffusion Thomson « up » (vers les courtes longueurs d'onde) d'un faisceau 3ω standard de l'installation Omega sur une onde plasma stimulée par SRS, collectée par l'un des diagnostics UV disponibles sur l'enceinte Omega habituellement destiné à collecter la lumière produite à $3/2\omega$ par l'instabilité deux plasmons. Après le test réussi de novembre 2002,

ce diagnostic a été utilisé en octobre 2003 pour réaliser des mesures résolues spatialement des ondes plasma électroniques [Kir06]. Après une séquence de 6 tirs durant laquelle le faisceau sonde était repointé à chaque tir (d'après des coordonnées pré-caractérisées), toute l'équipe expérimentale était très enthousiaste à l'idée d'accéder enfin à la localisation de l'instabilité Raman dans les profils hydrodynamiques « chahutés » des gasbags (Fig. 1). Le même principe de diffusion Thomson a été appliqué par la suite pour sonder les ondes plasma

Laser-Plasma Interaction Studies on Omega

The first CEA laser plasma interaction campaign has been performed on Omega in November 2002 with the main goal of understanding the Stimulated Raman Scattering (SRS) growth and saturation in high temperature plasmas. This first experiment carried out by the CEA, followed an earlier collaboration on this subject between the two laboratories (CEA and LLE) in 2002, and made possible by Wolf Seka's cordial invitation to take part in his experiments at LLE. In addition to the extensive SRS backscattered light measurements performed in gasbag targets by the LLNL interaction group, a new Thomson scattering configura-

tion was designed for probing electron plasma waves stimulated by the Raman backscattering instability, and successfully tested on Omega during this first campaign. This diagnostic is based upon the Thomson up-scattering (that is towards shorter wavelengths) of a 351-nm Omega beam on the SRS stimulated electron plasma waves (EPW). The Thomson scattered light is collected by the LLE's standard $3\omega/2$ diagnostic. After the successful test of November 2002, the diagnostic was used in October 2003 to obtain space-resolved measurements of the EPWs [Kir06]. After 6 shots during which the probe beam was centered in the plasma, the team was keen

to reach the SRS instability location in the intricate electron density profiles resulting from gasbag hydrodynamics (Fig. 1). The same Thomson scattering principle was then applied to probing electron plasma waves stimulated in crossing beams experiments. After several years of experimental studies on Omega, the gasbag platform has been gradually replaced by a new hohlraum platform developed by LLNL for laser-plasma interaction experiments in the indirect drive context with the advantage of producing higher electron temperatures more relevant of NIF and LMJ conditions. In this new configuration, the interaction beam propagates

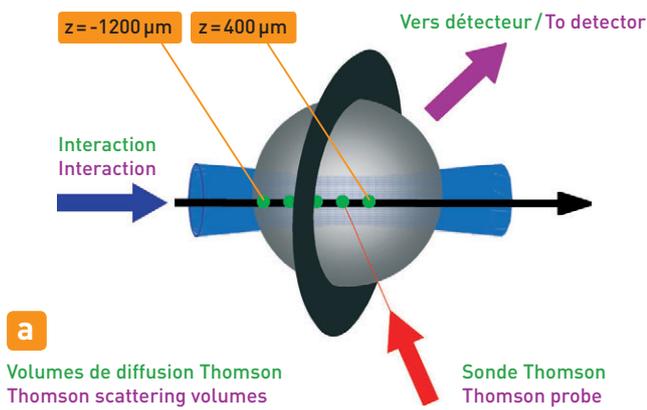
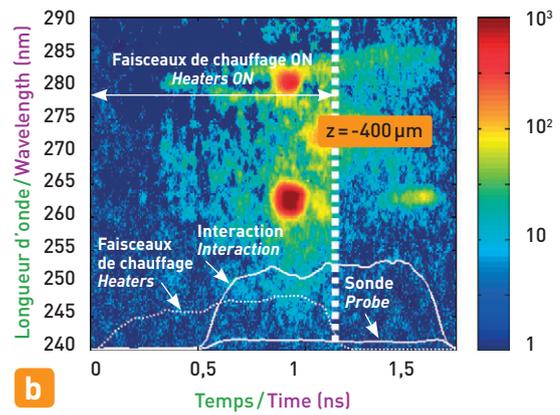


Fig. 1 : (a) Géométrie de l'expérience de diffusion Thomson dans un gasbag. (b) Spectre de diffusion Thomson résolu temporellement mesuré en $z = -400 \mu\text{m}$.



(a) Geometry for the Thomson scattering experiment in gasbag targets. (b) Time resolved Thomson scattering spectrum measured at $z = -400 \mu\text{m}$.

stimulées dans des expériences de croisement de faisceaux. Après plusieurs années d'études expérimentales, la plateforme d'interaction utilisant des **gasbags** a progressivement été remplacée par une nouvelle plateforme basée sur l'utilisation de cavités développées par le **LLNL** pour les expériences d'interaction dans le contexte de l'**attaque indirecte** avec l'avantage de créer des plasmas de température électronique plus élevée, donc plus représentative des conditions

LMJ et **NIF**. Dans cette nouvelle configuration, le faisceau d'interaction se propage selon l'axe de symétrie de la cavité sur 2 mm. Le premier diagnostic de l'**instabilité Raman** repose sur les mesures de rétrodiffusion réalisées sur le faisceau sonde en fonction de la densité électronique et de l'intensité du faisceau d'interaction (*Fig. 2*). Un seuil apparaît clairement dans les rétrodiffusions mesurées pour $n_e/n_c = 0,09$ (où n_e est la densité électronique du plasma et n_c la

densité critique à 3ω) lorsque l'éclairement est de l'ordre de 10^{15} W/cm^2 . Malgré ce résultat très clair obtenu dans les réflectivités intégrées, les spectres résolus en temps correspondant restaient très compliqués à interpréter. Il a donc été décidé d'utiliser le diagnostic de **diffusion Thomson** précédemment développé pour les études en **gasbag** pour acquérir des mesures spatialement résolues de la croissance de l'**instabilité Raman** dans ces cavités. ●

along the **hohlraum** axis of symmetry over a 2 mm long plasma. The first diagnostic of the **SRS** instability consisted in measuring the **SRS backscattered light** with the probe beam as a function of the gas fill density and interaction beam intensity (*Fig. 2*). A clear threshold was observed when $n_e/n_c = 0.09$ (where n_e is the plasma electron density and n_c is the **critical density** at 3ω) for a laser intensity of around 10^{15} W/cm^2 . In spite of this clear result observed in the integrated backscattered reflectivity, the corresponding time-resolved spectra were hard to interpret. It was then decided that the **Thomson scattering** diagnostic previously used in **gasbag** experiments could provide further space resolved detailed measurements of the **SRS** growth in these targets if applied in the **hohlraum** configuration. ●

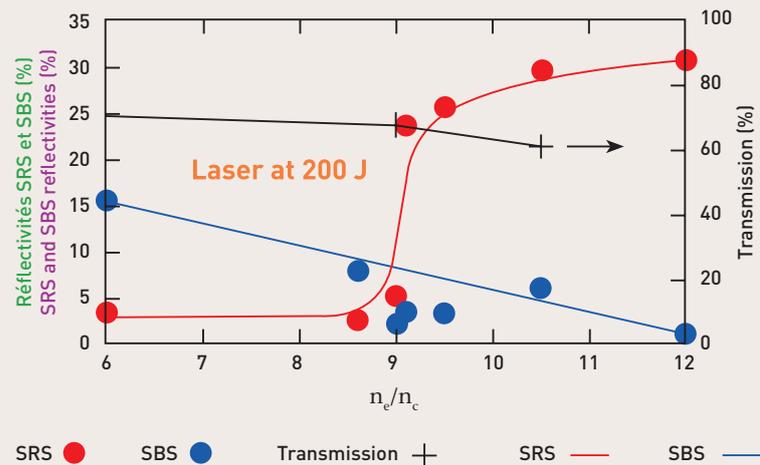


Fig. 2 : Réflectivités Raman (SRS) et Brillouin (SBS) mesurées dans la configuration hohlraum en fonction de la densité électronique. SRS and Stimulated Brillouin Scattering (SBS) reflectivities measured in the hohlraum configuration as a function of the electron density.

J.-P. JADAUD, D. BABONNEAU, J.-L. BOURGADE, F. GIRARD,
L. LOURS, M.-C. MONTEIL, P. RENAUDIN, B. VILLETTE, F. WAGON
CEA - DAM - Île-de-France

R. BOTREL
CEA - Valduc

P. DI NICOLA
CEA - CESTA

E. DEWALD, C.S. SORCE, R.E. TURNER
LLNL

R.E. BAHR, J.P. KNAUER, B. YAAKOBI
University of Rochester - LLE

X-ray Conversion Experiments

Conversion of laser power to x-ray power is essential for the design of **indirect drive** experiments [Lin95]. Modeling the relevant phenomena responsible for this conversion is complex and yields uncertainties in the simulations. For those reasons, the first CEA experiments carried out on Omega had the following goals: *i*) x-ray conversion experiments in open geometry to benchmark numerical simulations, *ii*) **indirect drive** experiments to assess the performance of **hohlraums** that were to be used on subsequent experiments to characterize implosion symmetry or hydrodynamic instability growth. The Omega Facility delivers a very uniform irradiation on spherical targets [Sku99]. This almost 1-D irradiation has two major advantages: *i*) it makes numerical simulations benchmarking easier and more relevant by minimizing 2-D effects; *ii*) the influence of

self-generated magnetic fields that may affect electron transport are minimized. As a continuation of prior LANL & LLE experiments [Gol87], CEA led several experimental campaigns on Omega since 1999, at laser intensities ranging from 3×10^{13} up to 1×10^{15} W/cm² with square or shaped pulses, the duration of which was between 1 and 3.5 ns. Targets were solid CH spheres coated with a few microns of gold. The x-ray conversion was characterized by broad-band time-resolved x-ray spectrometers [Kor86, Bou01], and time and spectrally resolved x-ray imaging [Ze92] (Fig. 1). Laser absorption was measured and the gold plasma conditions were inferred from Thomson scattering diagnostics and x-ray spectroscopy of a thin tracer layer buried in the gold.

Cross comparison of the different measurements enabled benchmarking of

atomic physics and thermal conduction models used by hydrocodes and assessment of their time evolution. Time resolved x-ray emission and the size variation of emitting zones with time, inferred from x-ray imaging, proved to be very valuable observables for this benchmarking [Bow04]. X-ray conversion of uranium and gold-uranium cocktails was studied during collaborative campaigns with LLNL [Dew08]. Those experiments were motivated by the potential benefit provided by those materials to optimize **hohlraum** performance [Sch07, Jon07]. The first **indirect drive** experiments in 2001 tested cylindrical **hohlraums** for implosion symmetry studies. They were followed in 2003 by comparisons between cylindrical and “rugby shaped” **hohlraums** [Van07]. The influence of gas fill on drive and wall blow-off motion [Cas09] were investigated later. Recent experiments validated **hohlraum** performance at radiation temperatures above 250 eV [Phi10] approaching drive temperatures for LMJ ignition target designs (Fig. 2). ●

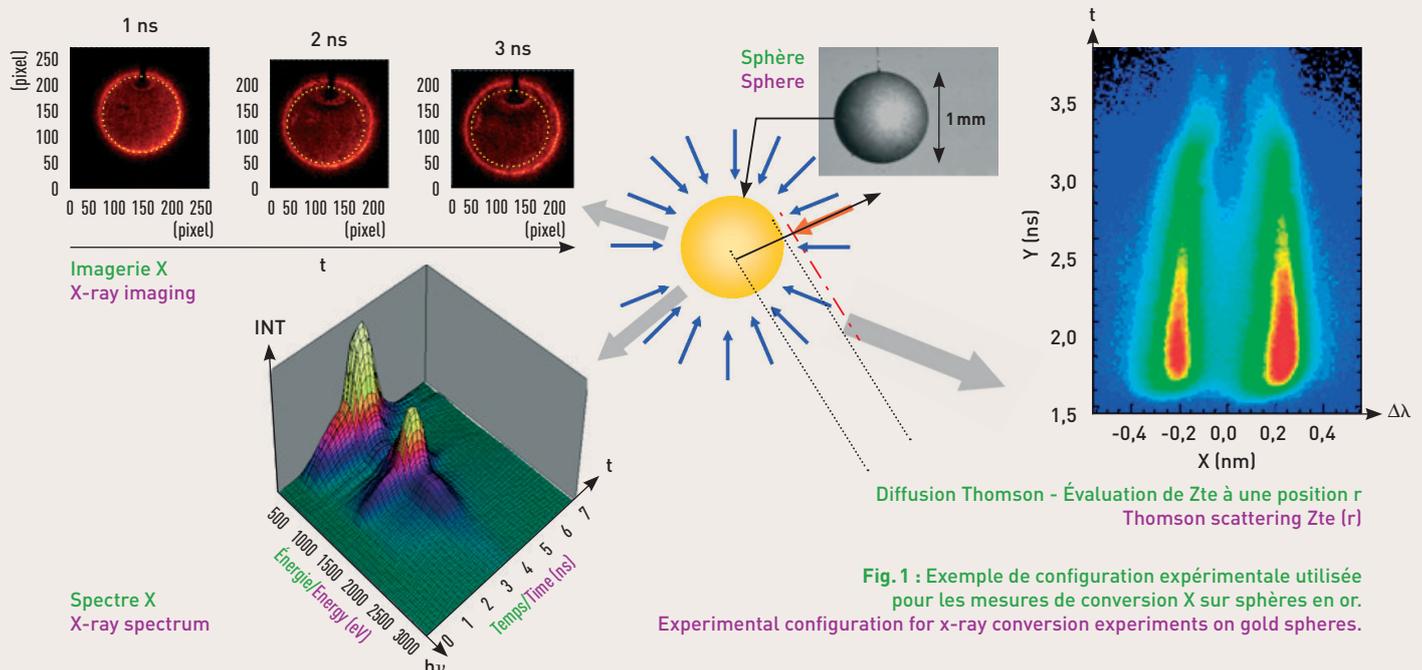


Fig. 1 : Exemple de configuration expérimentale utilisée pour les mesures de conversion X sur sphères en or. Experimental configuration for x-ray conversion experiments on gold spheres.

Expériences de conversion X

La conversion en rayonnement X

de la puissance délivrée par le laser est un élément essentiel du dimensionnement des expériences en **attaque indirecte** [Lin95]. Les processus physiques intervenant dans cette conversion sont complexes et délicats à simuler. Pour ces raisons, les objectifs des premières expériences prévues par le CEA sur Omega ont été : *i*) des expériences de conversion X en géométrie ouverte, destinées à évaluer les simulations numériques, *ii*) des expériences de conversion X dans des cavités pour préparer des tirs ultérieurs d'étude de symétrie d'implosion et du développement d'instabilités hydrodynamiques. L'installation Omega permet d'éclairer une cible sphérique avec une très bonne uniformité [Sku99]. Cette irradiation quasi 1D offre deux avantages : *i*) elle facilite l'évaluation des modèles physiques des simulations en minimisant l'influence des effets 2D ; *ii*) elle minimise l'influence des champs magnétiques auto-générés par la cible qui peuvent affecter la conduction thermique électronique. Dans le prolongement d'expériences antérieures du LANL et LLE [Gol87], plusieurs campagnes d'expériences ont été réalisées, à partir de 1999, à des éclairagements compris entre 3×10^{13} et 1×10^{15} W.cm⁻² sur une durée de 1 à 3.5 ns avec des impulsions carrées ou mises en forme. Les cibles étaient des sphères pleines en polystyrène enrobées d'une couche de quelques microns d'or. La conversion X était caractérisée par diverses mesures : spectrométrie X large bande résolue en temps [Kor86, Bou01], imagerie X résolue spectralement et temporellement (Fig. 1). D'autres mesures visaient à évaluer l'absorption laser ou à caractériser le plasma d'or créé (**diffusion Thomson**, spectroscopie de traceurs enterrés dans la couche d'or).

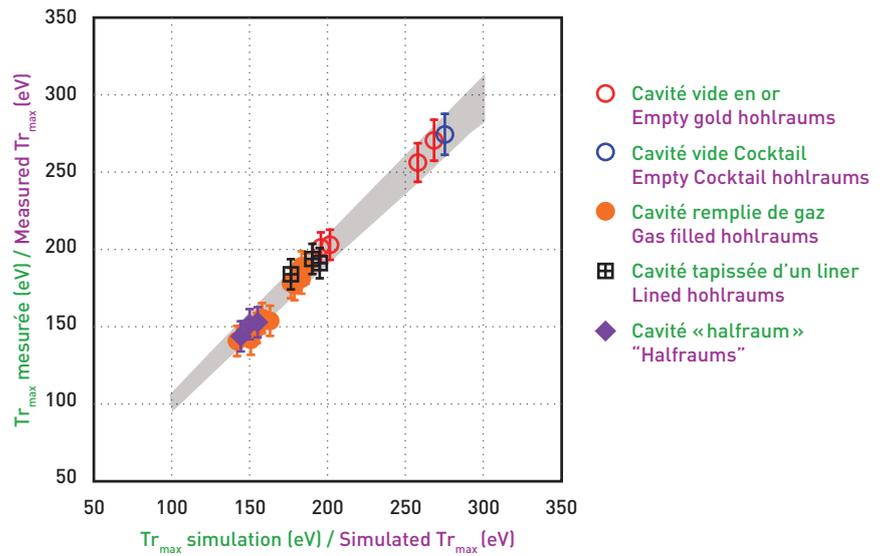


Fig. 2 : Comparaison des températures radiatives mesurée Tr_{mes} et simulée Tr_{sim} pour différents types de cibles utilisées sur des campagnes Omega. L'aire grisée indique le domaine d'incertitude de cette comparaison. Comparison of measured and simulated drive radiation temperatures Tr_{mes} and Tr_{sim} for different kinds of hohlraums used in indirect drive experiments on Omega. The shaded array denotes the uncertainty domain for this comparison.

La comparaison croisée des différents types de mesures, permet d'évaluer les modèles de physique atomique et de conduction thermique implantés dans les codes de simulation et de tester leurs évolutions. En particulier, les variations temporelles résolues spectralement de l'émission X et les évolutions de dimensions de zones émissives mesurées par imagerie se sont avérées des observables très sensibles pour l'évaluation de ces modèles [Bow04]. La conversion X de l'uranium et de composés « cocktail » à base d'or et d'uranium a été étudiée lors de campagnes en collaboration avec le LLNL [Dew08]. Cette étude était motivée par l'intérêt de ces matériaux pour optimiser les performances des

cavités [Sch07, Jon07]. En **attaque directe**, les premières expériences, en 2001, ont porté sur la validation des performances de cavités cylindriques utilisées pour des études de symétrie d'implosion. Elles ont été poursuivies en 2003 par des comparaisons cavités cylindriques, cavités « rugby » [Van07]. L'influence, sur les performances des cavités, de leur remplissage avec du gaz et de l'hydrodynamique des parois [Hus09] a ensuite été explorée. Des expériences récentes ont validé les performances de cavités à des températures radiatives supérieures à 250 eV [Phi10] approchant le domaine de température envisagé pour le fonctionnement des cibles d'**ignition** du LMJ (Fig. 2). ●

COMPARAISON DMX/Dante COMPARISON DMX VERSUS Dante ON OMEGA SHOT

B. VILLETTE, J.-L. BOURGADE,
P. STEMMLER, J.-P. JADAUD
CEA - DAM - Île-de-France

O.L. LANDEN, R.E. TURNER, C.S. SORCE
LLNL

G. PIEN, T. HINTERMAN
University of Rochester - LLE

IMAGERIE X À HAUTE RÉOLUTION (HRXI) HIGH RESOLUTION X-RAY IMAGER (HRXI)

P. TROUSSEL, J.-L. BOURGADE, B. ANGELIER, J. FARIAUT,
A. CASNER, G. HUSER, D. GONTIER, C. ZUBER
CEA - DAM - Île-de-France

T.C. SANGSTER, G. PIEN, P.A. JAANIMAGI, R.E. BAHR,
W.J. ARMSTRONG, J. DEWANDEL
University of Rochester - LLE

C.Y. COTÉ, S. MAGNAN
AXIS Photonique

Les diagnostics X du CEA sur Omega

La mesure du rayonnement X des plasmas laser est le moyen le plus approprié pour diagnostiquer leurs caractéristiques internes (température avec **DMX** ou **Dante**) et leurs évolutions spatio-temporelles (**HRXI**).

Comparaison DMX/Dante

Les spectromètres à rayons X large bande étalonnés en absolu, sont des diagnostics essentiels pour mesurer la puissance radiative émise par un plasma et sont l'une des clés pour définir les

conditions optimales de la **fusion par confinement inertiel** utilisant le rayonnement X produit en **attaque indirecte** à l'intérieur d'une cavité. Deux spectromètres basés sur une même technique de mesure, **DMX** [*Bou01*] (*Fig. 1*) et **Dante** [*Kor86*] respectivement développés par le **CEA** et le **LLNL** ont été comparés dès



Fig. 1 : Installation du diagnostic DMX sur la chambre d'expériences d'Omega [novembre 1999].
DMX instrument on Omega target chamber [November 1999].

CEA X-Ray Diagnostics on Omega

Measurement of the x-ray emission from laser-produced plasmas is the most appropriate tool for determining their internal characteristics (temperature with **DMX** or **Dante**) and their spatio-temporal evolution (**HRXI**).

Comparison DMX Versus Dante on Omega Shots

Absolutely calibrated x-ray spectrometers are essential diagnostics for measuring the radiative power of the plasma inside a **hohlraum** and are key diagnostics to determine if optimal conditions are achieved for **indirectly driven, inertially confined fusion** targets. Two nearly identical diagnostics, based on

the same measurement principle, **DMX** [*Bou01*] (*Fig. 1*) and **Dante** [*Kor86*], designed respectively by **CEA** and **LLNL**, have been installed on the **Omega** target chamber since 1999. Both diagnostics measure the x-ray spectra between 50 eV to 20 keV in 20 channels (**DMX**) or 18 (**Dante**). Each channel uses a collimator, a thin filter, and a vacuum x-ray diode connected to a fast recording oscilloscope. During the first shots on **Omega** (emitting plasma sphere), a large discrepancy (nearly a factor of 2) was observed in the emitted

x-ray power. This discrepancy was later explained by the deposition of a thin carbon layer on each sensitive part for **DMX** (x-ray diode and mirrors) which includes more mirrored channels (12) instead of only 3-4 for **Dante**. This highlighted the importance of performing frequent absolute calibrations of these crucial components [*Bou10-1*] so that the results of both diagnostics can be used to increase the confidence level of these crucial measurements particularly useful for achieving **ignition** (see article 5). ●

1999 sur l'installation laser **Omega**. Ces deux diagnostics comportent, pour l'un (**DMX**), 20 voies de mesure individuelle, et 18 pour le second réparties entre 50 eV et 20 keV. Chaque voie se compose de collimateurs, d'un filtre mince et d'une diode à vide reliée à un analyseur électrique rapide. Dès les premières mesures sur **Omega** (sur une sphère de plasma émettrice) une différence d'un facteur 2 entre les mesures déduites de ces 2 instruments a été observée. Cette différence a été attribuée à la formation d'un dépôt de résidus carbonés sur les principaux composants (miroirs et diodes) de **DMX** (qui comporte 12 voies à miroirs contre seulement 3-4 pour **Dante**). La qualité de ces instruments repose donc sur leur étalonnage en absolu, qui doit être réalisé très régulièrement [Bou10-1]. Depuis, ce suivi régulier permet à chaque campagne d'expériences commune, et si les conditions expérimentales le permettent, de confronter leurs résultats respectifs et ainsi d'accroître le niveau de confiance de cette mesure fondamentale à l'atteinte de l'**ignition** (voir article 5). ●

Imagerie X à haute résolution (HRXI)

Entre 2001 et 2008, les équipes du centre **CEA-DIF** ont développé **HRXI**, un diagnostic d'imagerie X à haute résolution, dédié à l'analyse des plasmas laser. **HRXI** associe deux instruments à la pointe de la technologie: un microscope X à haute résolution spatiale et une **caméra à balayage de fente (CBF)** ultrarapide. Cette association permet d'obtenir à la fois une résolution spatiale de 5 μm et temporelle de 30 ps. Le microscope de type Wölter, présenté sur la Fig. 2a a été utilisé sur **Phébus** [Tro05]. La **CBF** utilise un tube de type bilamellaire pour permettre à la fois une résolution temporelle de 30 ps et spatiale de 15 lp/mm. L'émission X de la source de radiographie (**Ti** à 4.8 keV) nécessite l'utilisation d'une photocathode en transmission en **CsI** plus sensible dans cette gamme spectrale. Elle est déposée sur un substrat en **CH** de 800 nm d'épaisseur.

L'image de l'écran de sortie de la **CBF** est numérisée par une **caméra CCD** refroidie de 1340 par 1300 pixels. Cet ensemble est présenté sur la Fig. 2b.

HRXI a été testé avec succès pour la première fois le 27 avril 2006 sur **Omega** lors d'une campagne de tirs **CEA/DOE-LLE** [Bou08-3,DOE06]. Lors de ces tests, **HRXI** a enregistré la mise en vitesse d'une feuille de **plastique dopé au Ge** de 45 μm d'épaisseur par le rayonnement X d'une cavité en forme de ballon de rugby chauffée par les 40 faisceaux d'**Omega** pendant 2 ns. La **CBF** a permis de suivre sa mise en vitesse (60 $\mu\text{m}/\text{ns}$) sur près de 3 ns (durée de la source de radiographie). La résolution spatiale de l'ensemble a pu être mesurée à 5 μm en observant la bonne résolution de fils de 10 μm de diamètre positionnés dans l'objet. ●

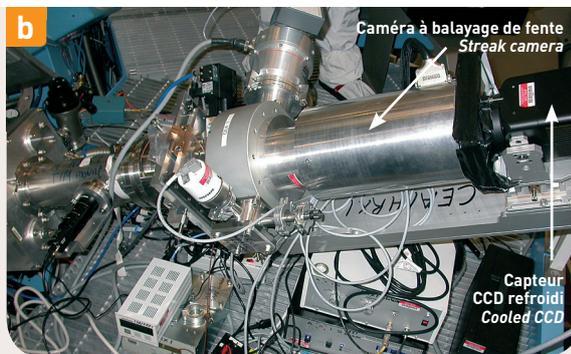


Fig. 2 : (a) Microscope de Wölter à rayons X pour HRXI installé sur Omega (TIM#4). (b) Caméra à balayage de fente et capteur CCD refroidi pour HRXI. (a) The Wölter x-ray microscope for HRXI installed into the Omega's TIM#4. (b) Streak camera and cooled CCD for HRXI.

High Resolution X-ray Imager (HRXI)

Between 2001 and 2008, the **CEA-DIF** center developed the **HRXI**, a high-resolution time-resolved x-ray imaging diagnostic designed to image laser produced plasmas. **HRXI** combines two state-of-the-art x-ray technologies: a high-resolution x-ray microscope and a high-speed x-ray **streak camera**. The resulting instrument achieves a spatial and temporal resolution of $\sim 5 \mu\text{m}$ and $\sim 30 \text{ps}$, respectively. The Wölter type x-ray

microscope for **HRXI** previously used on **Phébus** experiments [Tro05] is shown in Fig. 2a. The **streak camera** includes a bilamellar type streak tube that achieves both high temporal (30 ps) and spatial (15 lp/mm) resolutions. To match the emitted x-ray backlighter spectrum used for these experiments (**Ti** foil emission near 4.8 keV) a transmission mode photocathode was used with a thin **CsI** coating (10 nm) deposited on a **CH** of 800 nm-thick foil. The **streak tube's** image is recorded on a cooled 1340 x 1300 pixel **CCD**. The **streak camera** and **CCD** are shown in Fig. 2b.

HRXI was successfully tested on **Omega** for the first time during a joint **CEA/DOE-LLE** campaign on April 27, 2006 [Bou08-3,DOE06]. For these tests **HRXI** recorded the acceleration of a thin **Ge-doped CH** (45 μm thick) foil driven by radiation from a rugby-shaped hohlraum heated by 40 **Omega** beams of 2-ns duration. The x-ray **streak** recorded the motion of this foil in time (velocity of 60 $\mu\text{m}/\text{ns}$) using a 3-ns x-ray backlighter source. The spatial resolution on the streaked image has been estimated to be $< 5 \mu\text{m}$ on the basis of the well resolved 10 μm -diameter fiducial wires. ●

Irradiation Symmetry Experiments

Achieving ignition in indirect drive requires the irradiation symmetry around the capsule inside the **hohlraum** be controlled to obtain spherical implosions. The **Omega** laser with its 40 drive beams arranged into multiple cones for **indirect drive** is representative of the **LMJ** configuration. The goals of our symmetry experiments were (i) to measure time-resolved irradiation uniformities of a SiO₂ aerogel spheres [Ame95], and (ii) to investigate time-resolved x-ray images of the imploded cores of D₂/Ar-filled capsules [Hau95].

The first symmetry experiments aimed at emulating the 3-cone irradiation **LMJ** target configuration. Experiments were pursued by comparing 2-cone and 3-cone irradiation configurations, where the irradiation was either optimized to lead to a spherical implosion, or intentionally detuned to validate the control of the distortion in the code used to produce the simulations. In 2005, we obtained the first x-ray images of both the self-emission from stagnating cores and the shells in-flight. In 2007, a campaign was carried out to characterize the wall motion of the cylindrical **hohlraums**. 2-D x-ray images in three spectral ranges allowed the emission profile of the expanding plasma in empty, gas-filled, and **CH**-lined, gold-coated cylindrical **hohlraums** to be measured [Hus09]. The interest of using a prolate-spheroid (“rugby-shaped”) **hohlraum** for **indirect drive** capsule implosions was investigated [Van10]. Compared to the cylindrical **hohlraum**, the rugby-shaped **hohlraum** allows for a shorter **hohlraum** due to its wall angle providing increased polar irradiation on the

capsule and higher energy gain since the **hohlraum** surface area is lower. Understanding this rugby-shaped **hohlraum** concept is of particular interest for **LMJ** target designs, was the goal of various campaigns on the **Omega** laser facility between 2006 and 2009.

In 2006, with a 2-cone configuration in **hohlraums** without gas fill with identical radii and lengths but with different **hohlraum** shapes, showed increased irradiation at the poles for capsules in rugby-shaped **hohlraums** compared to cylindrical **hohlraums**, as expected from the simulations (Fig. 1) [Phi07]. In 2008, with a 2-cone configuration radiography of SiO₂ aerogel spheres in

gas-filled **hohlraums** with three differently shaped walls: cylindrical and rugby-shaped with various wall angles was executed. This campaign demonstrated higher radiation temperatures and showed the change in the **ablation** front distortion as a function of the polar irradiation level (i.e. as a function of the wall slopes) (Fig. 2) [Tas08]. In 2009, a campaign, performed in collaboration with **LLNL** and **MIT**, was dedicated to optimized implosions in cylindrical and rugby-shaped vacuum **hohlraums** with a 3-cone irradiation configuration involving all available laser beams, demonstrating that the x-ray drive is enhanced with rugby-shaped **hohlraums** [Ame07,Phi10]. ●

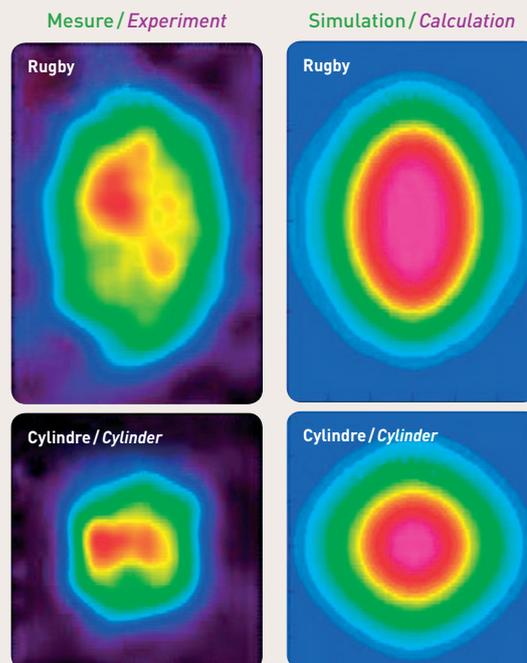


Fig. 1 : Imageries X des formes de cœur mesurées et simulées dans des cavités cylindres ou rugby. Measured and calculated x-ray imploded core images of cylindrical and rugby-shaped hohlraums.

Expériences de symétrie d'irradiation

L'atteinte de l'ignition en attaque indirecte impose de maîtriser la symétrie d'irradiation autour de la capsule située au centre de la cavité, pour obtenir une implosion sphérique. La configuration de l'installation **Omega**, avec ses 40 faisceaux disponibles en **attaque indirecte**, permet de grouper les faisceaux en configurations d'irradiation à plusieurs cônes représentatives de celles qui seront utilisées avec le laser **LMJ**. Les objectifs de nos expériences de symétrie ont été, soit de mesurer l'isotropie d'irradiation au cours du temps d'une bille d'aérogel de silice par radiographie [Ame95], soit de visualiser la forme du cœur d'un microballon en fin d'implosion par imagerie X d'un mélange deutérium-argon [Hau95].

Les premières expériences de symétrie visaient donc à émuler l'irradiation d'une cible **LMJ**, avec 3 cônes. Elles ont été poursuivies par des comparaisons de configuration d'éclairage à 2 ou 3 cônes, où l'irradiation était soit optimisée pour conduire à une implosion sphérique, soit volontairement dégradée pour valider le contrôle de la déformation obtenue dans les simulations. En 2005, nous avons réalisé pour la première fois sur le même tir, une imagerie d'implosion du cœur, couplée à une radiographie d'implosion du microballon. Des expériences amont en 2007 avaient également pour objectif la mesure de la détente des parois dans une cavité cylindrique : des imageries X axiales dans trois bandes de fréquence ont permis de mesurer les profils d'émission du plasma en détente de cavité vide, remplie de gaz ou tapissée d'une fine couche en **CH** [Hus09]. Nous avons démontré l'intérêt du concept de cavité en forme de ballon

de rugby pour les implosions de capsules en **attaque indirecte** [Van10]. Cette cavité permet, en effet, principalement par rapport à la forme cylindrique, une optimisation dans une cavité plus courte du fait de ses pans inclinés favorisant l'irradiation des pôles du microballon, et un gain énergétique en raison de sa surface de paroi plus faible. Cette forme de cavité, particulièrement intéressante dans les dimensionnements théoriques des cibles **LMJ**, a donc fait l'objet de plusieurs campagnes de tirs sur **Omega** entre 2006 et 2009.

En 2006, des implosions, avec une configuration à 2 cônes, dans des cavités vides de longueur identique, mais de forme différente, ont montré l'irradiation accentuée aux pôles dans une cavité « rugby » par rapport à une cavité cylindrique, comme le prévoient les

simulations (Fig. 1) [Phi07]. En 2008, des radiographies de bille d'aérogel de silice ont été effectuées avec une configuration à 2 cônes, dans des cavités remplies de gaz de trois formes différentes : cylindrique ou de forme rugby schématisées par des pans inclinés d'angle différents. Elles ont mis en évidence à la fois le gain énergétique et la variation de la déformation du front d'ablation en fonction de l'angle des pans inclinés de la cavité. Le niveau d'éclairage des pôles est fonction de l'inclinaison de la paroi (Fig. 2) [Tas08]. En 2009 enfin, des implosions optimisées en cavités cylindriques et « rugby », vides de gaz, avec une configuration d'irradiation à 3 cônes utilisant tous les faisceaux disponibles de l'installation, réalisées en collaboration avec le **LLNL** et le **MIT**, ont également mis en évidence l'avantage énergétique de cette dernière [Ame07, Phi10]. ●

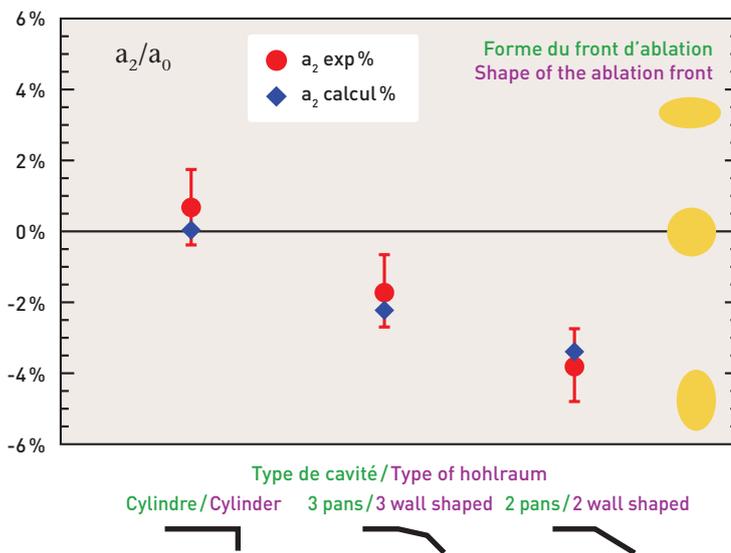


Fig. 2 : Déformation du front d'ablation en fonction de l'inclinaison de la paroi. Une cavité « 2 pans » favorise l'irradiation aux pôles. Distortion of the ablation front as a function of hohlraum wall slope. Irradiation at the poles is increased by a pannels shapping the ends of the hohlraum.

M. VANDENBOOMGAERDE, F. PHILIPPE, J. BASTIAN, T. CAILLAUD,
A. CASNER, G. HUSER, J.-P. JADAUD, S. LAFITTE, O. LANDOAS,
S. LIBERATORE, G. MALINIÉ, M.-C. MONTEIL, P. SEYTOR

CEA - DAM - Île-de-France

P. AMENDT, H.S. PARK, H. ROBEY, C.S. SORCE

LLNL

R. PETRASSO, C.K. LI, F. SEGUIN

MIT

V. GLEBOV, G. PIEN, C. STOECKL, K. THORP

University of Rochester - LLE

La cavité rugby

En 2000, les équipes du CEA réfléchissaient à une cavité adaptée aux besoins français pour les expériences laser sur l'installation Omega. Un potentiel défaut d'absorption d'un des cônes laser par la paroi de la cavité était suspecté; en effet, un des cônes avait un faible angle d'incidence (21.4°) par rapport à la paroi et risquait de se réfléchir sur cette dernière en partie avant d'être absorbée sur cette dernière. Comme la valeur de cet angle était fixée par la forme de la cavité cylindrique utilisée, M. Vandenboomgaerde eut l'idée d'incliner la paroi de 10.5° , augmentant ainsi l'incidence relative entre le cône

et la paroi. La forme de la cavité en fut modifiée et ressembla à un ballon de rugby avec ses parties internes inclinées (Fig. 1a). Rapidement les premières simulations et plans furent réalisés au CEA (Fig. 1) et présentés au séminaire CEA/DOE d'octobre 2000. Les fabrications furent réalisées en 2001 pour des tirs en 2002 [Tas01]. Cette cavité sera d'abord utilisée comme plateforme pour des expériences d'instabilités hydrodynamiques [Cas10-1]. Ces tirs serviront aussi de test pour ce concept novateur de cavité et permettront des communications dans de nombreuses conférences internationales.

Pour de futures expériences sur le Laser MégaJoule, la question de l'utilisation de cavité rugby fut abordée parallèlement; une étude théorique montra que sa forme permettait de réduire sensiblement l'énergie laser à utiliser par rapport à une cavité cylindrique classique et un meilleur contrôle de la symétrie lorsque l'on n'utilise que deux cônes laser avec la même énergie. Dès 2006, le CEA lance un programme expérimental d'implosions et de contrôle de la symétrie d'irradiation en cavité rugby sur Omega [Mon10]. Certains de ces résultats, l'étude théorique, et son application à un design d'ignition cryogénique pour le LMJ furent publiés en 2007 [Van07]. Simultanément au LLNL, P. Amendt proposait indépendamment un nouveau design d'ignition utilisant des cibles à

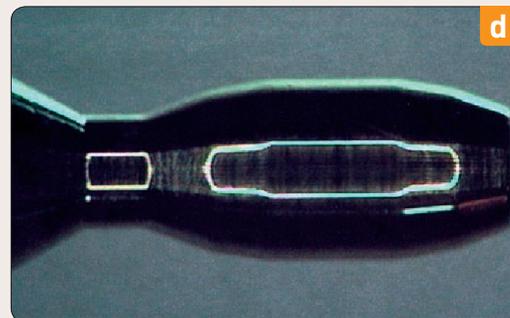
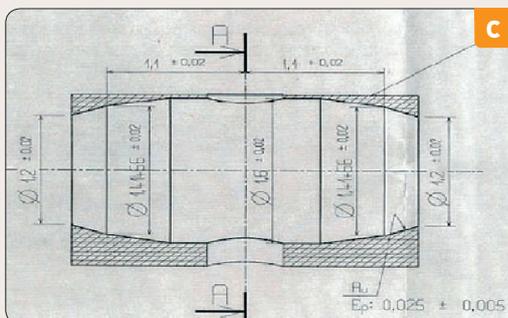
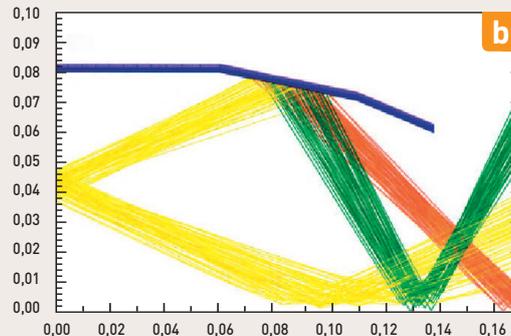
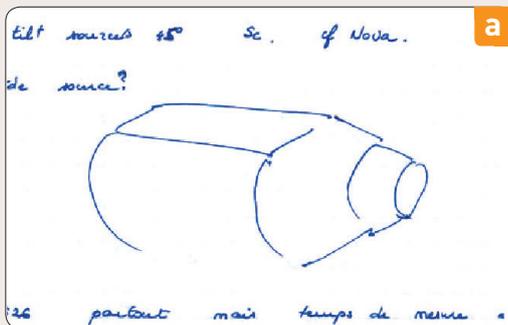


Fig. 1 : (a) Un des premiers croquis de la cavité rugby
One of the first rough drafts of the rugby hohlraum

(b) Premières simulations
First numerical simulations

(c) Plans initiaux
First blueprints

(d) Premiers mandrins de fabrication.
First chucks for manufacturing.

doubles coquilles et une cavité de forme similaire pour le NIF [Ame07].

De récentes expériences partant d'une étude préliminaire [Ame08], et dans le cadre d'une collaboration avec le LLNL et le MIT, ont permis de vérifier le gain énergétique à l'échelle de l'installation Omega [Phil10,Rob10] des cavités rugby (Fig. 2) par rapport aux cavités cylindriques. À cette occasion, nous avons atteint le rendement neutronique le plus élevé jamais obtenu en **attaque indirecte**, ce qui nous a donné accès pour la première fois à de nombreux diagnostics nucléaires, tels que l'imagerie neutronique [Dis10] développée par le CEA et jusqu'alors utilisée uniquement pour les tirs d'attaque directe du LLE du fait d'un nombre de neutrons plus important. ●

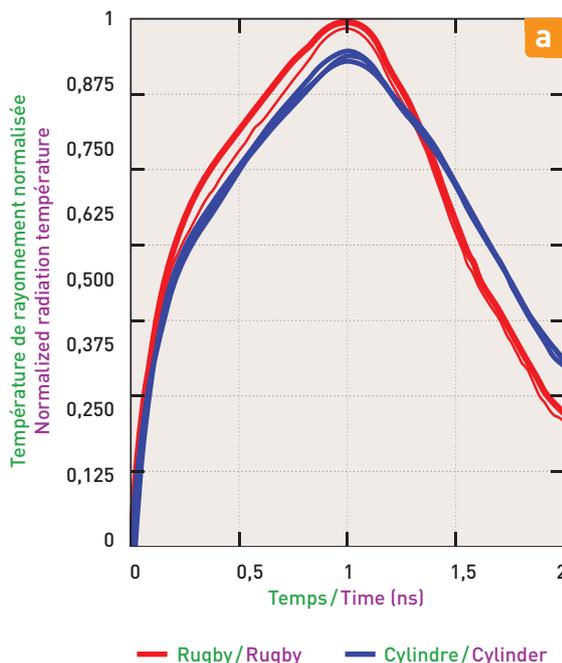


Fig. 2 : (a) Mise en évidence expérimentale de l'avantage énergétique des cavités rugby. Experimental proof of the energetic advantage.



Fig. 2 : (b) La cavité rugby utilisée en 2009. Rugby hohlraum for 2009 campaign.

Rugby Shaped Hohlräume

In 2000, CEA teams looked for a **hohlraum** which could be used for the French laser experiments on the Omega facility. Possible specular reflection problems of one of the laser cones at very low angle of incidence (21.4°) with the wall was suspected: this cone could bounce off the wall without being totally absorbed. As the angle of incidence could not be changed, M. Vandenboomgaerde proposed to change the angle of the wall by 10.5° to increase the angle between the laser beam and the wall. As a result, the shape of the **hohlraum** was modified and making it look like a rugby ball with several straight sections (Fig. 1a). The first numerical simulations and blueprints were soon carried out at CEA (Fig. 1) and presented at the CEA/DOE workshop in October 2000. **Hohlraums** were built in 2001 to be

used in 2002 [Tas01]. The first **hohlraum** was used as a platform for hydrodynamic instability experiments [Cas10-1]. This campaign tested this new rugby concept and the results were presented in many international conferences. The potential of this new kind of **hohlraum** was investigated for use on LMJ; a theoretical study showed that the rugby shape allowed for a noticeable reduction in laser power compared to a standard cylindrical **hohlraum**. Furthermore, the rugby shape allowed for improved symmetry control of the implosion when only two laser cones with the same energy are used to heat the **hohlraum**. In 2006, the CEA launched an experimental campaign to study implosions and the control of irradiation symmetry in rugby **hohlraums** on Omega [Mon10]. Some of these results and the under-

lying theoretical study and its implications for LMJ ignition targets were published in 2007 [Van07]. At the same time at LLNL, P. Amendt independently proposed a new rugby-shaped **ignition** design based on double-shell targets for the NIF [Ame07]. Recent experiments in collaboration with LLNL and MIT based on an early design study [Ame08] have demonstrated the energetic advantage of rugby hohlraums over cylindrical **hohlraums** on Omega [Phil10,Rob10] (Fig. 2). The largest neutron yields ever obtained in **indirect drive** implosions have been measured with the rugby targets. This allowed the use of many nuclear diagnostics such as the neutron imaging [Dis10] in **indirect drive experiments** for the first time which were previously tested by CEA on the **direct drive** campaigns of the LLE due to higher yields. ●

L. DISDIER, O. LANDOAS, A. ROUYER, J.-L. BOURGADE,
A. FEDOTOFF, I. THFOIN, T. CAILLAUD
CEA - DAM - Île-de-France

V.YU. GLEBOV, C. STOECKL, W.J. ARMSTRONG,
T.C. SANGSTER, F.J. MARSHALL
University of Rochester - LLE

R.A. LERCHE
LLNL
D.C. WILSON
LANL

Neutron Imaging (NIS) on Omega

In inertial confinement implosion experiments, 14-MeV neutron imaging allows the deuterium-tritium fusion region to be observed. The experimental resolution has to be $< 10\ \mu\text{m}$ to interpret the images obtained previously by the simulations. The CEA decided in 2000 to activate the neutron imaging diagnostics at LLE, to carry out the research and development required. The diagnostics reused a Nova design [Res88] developed in the 1990s by LLNL, and then taken to Phebus [Gar94]. A penumbra aperture, made of a thick tungsten cylinder located at some tens of cm from the target, casts an image of the target on a scintillating fiber array located a few meters further away.

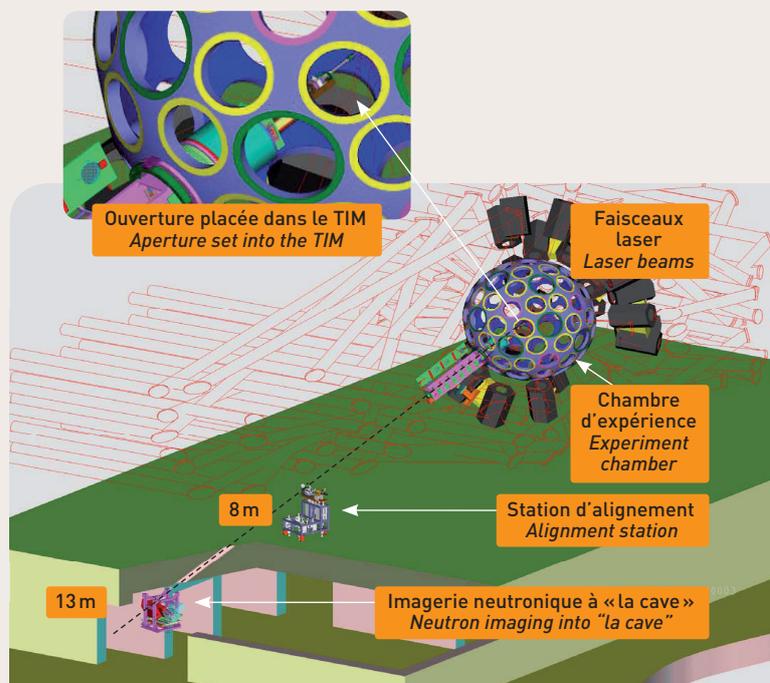


Fig. 1 : Schéma du diagnostic implanté à « la cave ».
Schematic of the neutron imaging diagnostic (NIS) installed in "la cave".

L'imagerie neutronique sur Omega

Dans les expériences d'implosion par confinement inertiel, l'image des neutrons de 14 MeV permet de visualiser la zone de fusion des ions de deutérium et de tritium. Une résolution inférieure à $10\ \mu\text{m}$ est nécessaire au concepteur d'expérience pour pouvoir interpréter ces images. L'activation du diagnostic d'imagerie neutronique au LLE par le CEA en 2000 fut décidée pour mener les études et développements nécessaires à l'atteinte de cet objectif. Le diagnostic reprenait alors le design

mis au point par les équipes du LLNL sur Nova dans les années 1990 [Res88], puis expérimenté sur Phebus [Gar94]. Un diaphragme de pénombre, réalisé dans un cylindre épais de tungstène placé à quelques dizaines de cm de la cible projette une image de la cible, sur une matrice de fibres scintillantes située à quelques mètres de la cible. La résolution du détecteur de neutrons, la distance à la cible et le nombre de neutrons limitaient la résolution des images de la cible à une centaine de micron. En 2001, une

résolution de $20\ \mu\text{m}$ est démontrée expérimentalement [Dis03]. L'amélioration résulte pour partie de l'allongement de la base de vol à 13 m, ce qui a nécessité le perçage de la salle d'expérience pour installer le détecteur dans « la cave » d'Omega (Fig. 1). La dalle en béton offre par ailleurs un blindage naturel pour l'instrumentation contre l'effet des neutrons et des rayons gamma. Simultanément, des travaux sont menés sur la résolution spatiale du détecteur et l'amélioration de l'efficacité de collection de la lumière.

The resolution of the neutron detector, length of the line of sight and neutrons yield set limits to the resolution of target images at $\sim 100\ \mu\text{m}$. In 2001 a resolution of $\sim 20\ \mu\text{m}$ was experimentally established [Dis03]. This improvement is partly attributable to the 13 meters extension of the flight base, which required the drilling a hole in the (1-m thick) floor of the experimental hall to install the detector in Omega's "la cave" (Fig. 1). The concrete slab (floor) provides shielding for neutron and gamma radiation. At the same time, studies were performed on the spatial resolution of detectors and the improvement of light collecting efficiency. In then past ten

years, five generations of detectors have evolved, from a 10,000-element-plastic-fiber matrix to the 100- μm -diameter capillary tubes filled with a scintillator liquid and assembled into an array of more than one million pixels [Dis04]. These advances have increased the neutron image quality and have allowed a fine comparison with the x-ray images of the targets at high convergence ratio (Fig. 2a) or as a function of exploding pushers parameters (Fig. 2b). The diagnostics improvements have allowed the first 2.45 MeV neutron image of an imploding target filled with deuterium only to be acquired. The diagnostic has been successfully activated on LLE cryogenic imploding targets. Three DOE re-

ports [DOE] evolved from these results, quite unprecedented at the time. The latter developments dealt with the improvement of signal-to-noise ratio of the neutron images. A ring aperture imaging technique has been shown to work experimentally in 2005, and its performance characteristics have been validated via comparison with penumbral imaging [Dis06]. Today studies focus on alignment techniques and determining the field of view to achieve the 10 μm spatial resolution [Thf10]. Some designs allowing simultaneous recording of primary and scattered neutrons are at the experimental stage at LLE. The overall study contributes to ignition observation on NIF, and also LMJ. ●

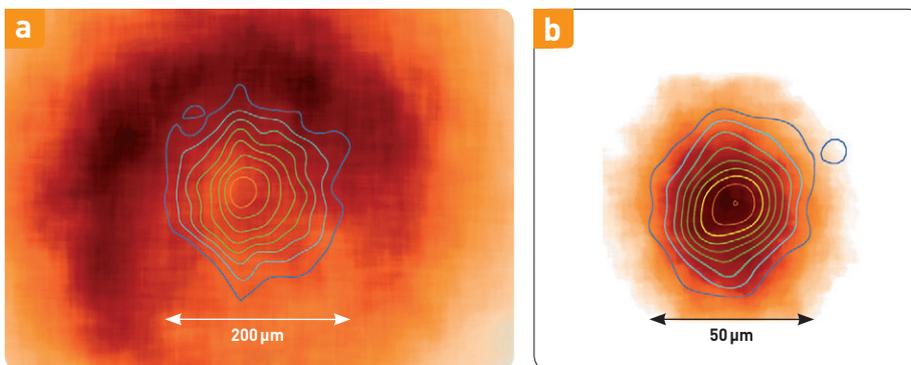


Fig. 2 : Comparaison entre les images X (4-7 keV) et neutroniques (contour). (a) Cible en verre (tir n°36017). (b) Cible en CH (tir n°35977). Comparison between x-ray images (4-7 keV) [color images] and neutron images (superposed contour plots) for (a) a glass target shot (Omega shot #36017), and (b) CH target shot (Omega shot #35977).

Cinq générations de détecteurs se succèdent en 10 ans, allant de la matrice de 10000 fibres plastiques à des capillaires de diamètre 100 μm remplis de scintillateur liquide assemblés dans une matrice de plus d'un million de pixels [Dis04]. Ces progrès permettent d'augmenter la qualité des images neutroniques et autorisent une comparaison fine avec les images X acquises sur des cibles à haut rapport de convergence (Fig. 2a) ou fonctionnant en poussoir explosant (Fig. 2b). L'amélioration du diagnostic a permis

également de réaliser la première image en neutrons de 2,45 MeV d'implosion de cible remplie uniquement de deutérium; enfin le diagnostic est activé avec succès sur les implosions de cibles cryogéniques réalisées par le LLE. Trois faits marquants du DOE reports [DOE] salueront ces résultats inédits à l'époque. Les derniers développements ont porté sur l'amélioration du rapport signal sur bruit. La technique d'imagerie par diaphragme annulaire a été démontrée expérimentalement dès 2005, et la comparaison avec l'imagerie

par pénombre a validé ses performances [Dis06]. Aujourd'hui les travaux portent sur les techniques d'alignement et le dimensionnement du champ d'observation afin de respecter l'objectif d'une résolution spatiale de 10 μm [Thf10]. Des designs permettant l'enregistrement simultané des neutrons primaires et diffusés par les zones denses de la cible sont à l'étude pour être expérimenté au LLE. L'ensemble de ces travaux concourent à l'observation de l'ignition sur le NIF puis le LMJ. ●

MESURE DU NOMBRE DE NEUTRONS NEUTRON YIELD MEASUREMENTS

O. LANDOAS, M. BRIAT, B. ROSSÉ, B. BRULLOT
CEA - DAM - Île-de-France

L. DISDIER, P. BERGONZO, D. TROMSON, H. HAMRITA
CEA - DRT - LIST - Saclay

V.YU. GLEBOV, T.C. SANGSTER
University of Rochester - LLE

DEMIN : UN SPECTROMÈTRE NEUTRONS POUR LA MESURE DE $\langle \rho R \rangle$

DEMIN : A NEUTRON SPECTROMETER
FOR $\langle \rho R \rangle$ MEASUREMENT

M. HOURY, B. ROSSÉ, O. LANDOAS
CEA - DAM - Île-de-France

E. DELAGNES, PH. LEGOU, I. GIOMATARIS
CEA - DSM - IRFU - Saclay

V.YU. GLEBOV, T.C. SANGSTER
University of Rochester - LLE

Mesures neutroniques sur Omega

La caractérisation de l'émission neutronique constitue un ensemble de mesures intégrées de la qualité d'une implosion par confinement inertiel, et qui requiert le développement de dispositifs expérimentaux adaptés.

Mesure du nombre de neutrons

Sur les installations NIF et LMJ, le nombre de neutrons produits caractérise la performance d'une expérience de Fusion par Confinement Inertiel. La mesure du nombre de neutrons est effectuée grâce à un ensemble de détecteurs composés de compteurs à scintillation et de diamants CVD (nTOF). L'étalonnage de ces détecteurs est réalisé par rapport au diagnostic d'activation du cuivre reconnu comme référence absolue pour la mesure du nombre de neutrons et son seuil de réaction élevé. Dès 2005, une étroite collaboration a été initiée entre les équipes du CEA (DAM et LIST) et du LLE sur l'étude de détecteurs diamants CVD pour la mesure du flux de neutrons, de la température ionique et de l'instant d'émission des neutrons. De nombreuses campagnes de mesures (≈ 80 tirs), à l'invitation du LLE, ont permis de développer et de valider ces détecteurs sur la gamme de mesure 10^{12} - 10^{19} neutrons [LLE07, LLE08]. Leur dimensionnement LMJ a été validé en 2009 par la mise en œuvre sur Omega du diagnostic d'activation du cuivre du CEA étalonné avec une incertitude de 4,8%. L'inter-comparaison [LLE09] de nos références d'étalonnage neutron respectives, indépendantes, montre un écart de 1% (Fig. 1) et devrait contribuer à abaisser l'incertitude sur la mesure du nombre de neutrons sur le NIF [San09]. L'année 2009 a été marquée par l'étalonnage, l'installation et la mise en service des détecteurs nTOF sur le NIF par les équipes LLE/NIF. Cette collaboration fructueuse permettra à terme de dimensionner l'ensemble des détecteurs du «Pack neutron» pour le LMJ. ●

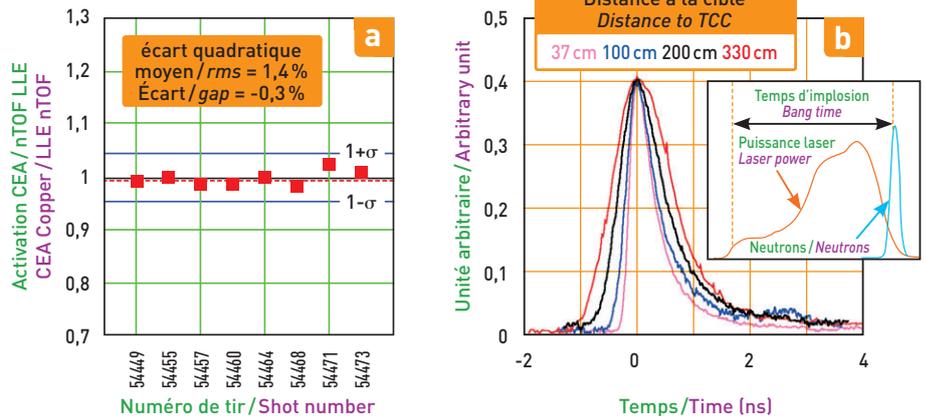


Fig.1 : (a) Comparaison des mesures d'activation CEA et nTOF du LLE montrant un écart inférieur à 1% de nos références d'étalonnage. (b) Mesures diamants CVD ont montré leur capacité à mesurer la température ionique (élargissement doppler de l'impulsion en fonction de la distance à la cible) et l'instant d'émission des neutrons avec une précision de 10 ps (encart à droite). (a) Shot to shot comparison between CEA activation and LLE nTOF measurements displaying a gap < 1%. (b) CVD diamond performance allowing measurement of the ion temperature (Doppler broadening as a function of distance to target) and bang time measurement with an accuracy of 10 ps (upper right insert).

DEMIN : un spectromètre neutrons pour la mesure de $\langle \rho R \rangle$

Le projet DEMIN [Hou06] est le fruit d'une collaboration entre le CEA/DAM et le CEA/DSM. Il a été conçu pour mesurer la masse surfacique $\langle \rho R \rangle$ du combustible contenu dans le microballon en fin d'implosion et permettre de diagnostiquer la performance de compression pour qualifier les scénarii menant à l'ignition. Le principe repose sur la mesure des neutrons issus des réactions secondaires ou tertiaires. En effet, la densité du milieu, au cours de l'implosion, va modifier le spectre en énergie des neutrons. DEMIN est basé sur le concept Micromégas [Gio96]: une chambre mince ($\sim 500 \mu\text{m}$) est remplie d'un gaz permettant une amplification des électrons créés par les particules la traversant. Les neutrons incidents créent des protons de recul par diffusion élastique dans une feuille de plastique placée en entrée du détecteur, jouant

le rôle de convertisseur. Ces protons sont détectés dans le Micromégas et les neutrons sont ainsi comptés un à un et leur énergie est déduite par temps de vol. DEMIN a, dès sa conception, intégré les contraintes fortes liées au bruit de fond nucléaire: flux γ et X, neutrons diffusés. Ces contraintes rendaient obsolètes les concepts jusqu'alors proposés pour la mesure de $\langle \rho R \rangle$.

DEMIN et son système d'acquisition MATAcq [Bre05] de 160 voies de numérisation (Fig. 2), ont montré des qualités exceptionnelles pour la transparence aux rayonnements γ et X, une détection rapide et un blindage aux effets électromagnétiques. Sa première mise en œuvre en 2005 a permis d'observer le spectre des neutrons secondaires d'une cible cryogénique D_2 sur Omega [Can07] (Fig. 2). ●

Neutron Measurements on Omega

Characterization of neutron emission is the main tool for determining the performance of inertial driven implosions and requires well characterized experimental diagnostics.

Neutron yield measurements

The neutron yield is one of the most important parameter to determine the performance of Inertial Confinement Fusion experiments on the LMJ and NIF facilities. Neutron yield measurements will be performed by an array of neutron time of flight (nTOF) detectors composed of scintillation counters and CVD diamonds. All these detectors are calibrated with respect to the copper activation diagnostic, which is recognized as the reference for the absolute neutron counting and its high reaction threshold. Since 2005, a close collaboration has been initiated between CEA teams (DAM and LIST) and LLE to study CVD diamond detectors to measure the neutron flux, the ion temperature and the bang time. Invited by LLE, CEA has participated in many neutron yield campaigns (≈ 80 shots) to develop and validate CVD diamonds for neutron yields in the 10^{12} - 10^{19} . Scaling to the LMJ range [LLE07,LLE08] was validated on Omega using CEA copper activation diagnostic, calibrated to 4.8% accuracy. Shot to shot comparison [LLE09] between CEA copper activation and LLE nTOF measurements shows a difference of 1% (Fig. 1). This independent and absolute calibration should contribute to the reduction of the primary yield error at the NIF [San09]. In 2009, nTOF detectors were calibrated on Omega, followed by their installation on NIF by LLE/NIF teams. This successful collaboration will help in scaling the future LMJ “neutron pack” detectors. ●

DEMIN : a neutron spectrometer for $\langle \rho R \rangle$ measurement

The DEMIN project [Hou06] results from a fruitful collaboration between CEA/DAM and CEA/DSM. It was designed to measure the areal density $\langle \rho R \rangle$ of the fuel contained in the capsule during its implosion and to evaluate the compression performance to qualify the different scenarios leading to ignition. The concept is based on the secondary or tertiary neutron measurements and the fact that the fuel density during implosions affects the neutron energy spectrum. DEMIN is based on the Micromegas concept [Gio96]: a thin chamber ($\sim 500 \mu\text{m}$) filled with a gas that amplifies the electrons created by the particles coming through the chamber. The conversion of incoming neutrons in knock-on protons is achieved in a plastic sheet placed in front of the detector, which plays the role of a converter. These

protons are detected in the Micromegas and the neutrons are thus counted one-by-one and their energy is deduced by their flight time. From its conception, DEMIN has taken into account the constraints of the nuclear background: x-ray and γ -ray fluxes and scattered neutrons. These strong constraints made some previously proposed concepts for the $\langle \rho R \rangle$ measurement obsolete.

DEMIN and the associated MATAcq [Bre05] acquisition system consisting of 160 numeric channels (Fig. 2), exhibit excellent features in terms of γ -ray and x-ray transparency, fast detection and electromagnetic effects shielding. Since its activation on Omega in 2005, it has successfully recorded the secondary neutron spectrum for a D_2 cryogenic target [Can07] (Fig. 2). ●

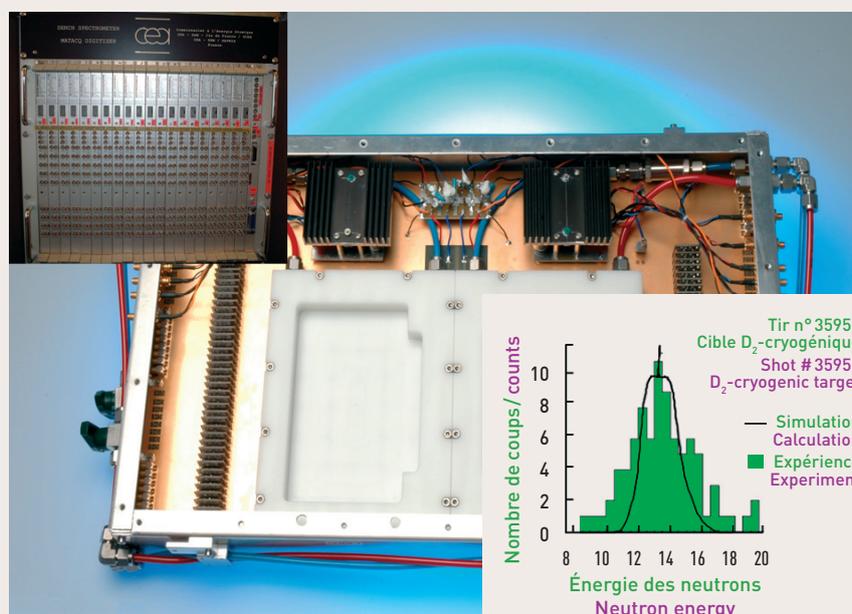


Fig. 2 : Vue du détecteur DEMIN (80 voies). Deux boîtiers identiques forment la version 160 voies. En haut à gauche : vue du système d'acquisition MATAcq (20 cartes de 8 voies chacune). En bas à droite : spectre des neutrons secondaires enregistré en 2005 par le diagnostic DEMIN lors du tir laser n° 35957 sur une cible D_2 cryogénique. View of the DEMIN detector (80 channels). Two identical boxes composed the 160-channels DEMIN. Upper-left: view of the MATAcq acquisition system (20 x 8-channels boards). Bottom-right: secondary neutron spectrum recorded in 2005 by the DEMIN diagnostic during shot # 35957 (D_2 cryogenic target).



Fig. 1 : Édifices de cibles complets (cavités à gaz et sources de radiographie) assemblés au CEA - CESTA (voir article 19). (a) cavité Rugby - (b) demi-cavité

Complete target assemblies (gas-filled cavities and radiography sources) assembled at CEA - CESTA (see article 19). (a) Rugby hohlraum - (b) Halfraum.

Hydrodynamic Instabilities Studies

Hydrodynamic instability (HDI) experiments in planar geometry, initiated in April 2002, were carried out until April 2006. These campaigns were dedicated to the study of the growth of perturbations in a germanium-doped **ablator**. This mechanism can result in a substantial degradation of the performances of an imploding **ignition** target on the **Laser Megajoule (LMJ)**. The themes under study were transport of perturbations (feed-in and feed-out), mode coupling and compared growth of 2D and 3D perturbations.

Les études d'instabilités hydrodynamiques

Les expériences d'Instabilités Hydrodynamiques (IHD) en géométrie plane initiées en avril 2002 sur les installations du laser **Omega** se sont poursuivies jusqu'en avril 2006. Ces campagnes de tirs avaient pour objectif l'étude du développement de perturbations dans un **ablateur** plastique dopé au germanium, mécanisme pouvant être responsable d'une dégradation im-

portante des performances lors de l'implosion d'une cible à gain avec le **laser Megajoule (LMJ)**. Les thèmes abordés ont été le transport de perturbation, le couplage de modes et le développement de perturbations 2D et 3D.

Ces expériences réalisées en **attaque indirecte** ont été les premières à mettre en œuvre des cavités en forme de ballon

de rugby, concept original repris dans le cadre de la **fusion par confinement inertiel (FCI)** [Ame07,Ame08, Van07, Van08] (Fig. 1a). Elles participent à la caractérisation d'un matériau **ablateur** candidat potentiel pour le **LMJ**, le plastique dopé au germanium, et constituent des bancs d'essai pour la validation de nos codes numériques. Un ensemble important de résultats a été obtenu [Cas09].

Depuis 2007, les expériences se poursuivent sur les installations du laser **Omega** avec une nouvelle configuration expérimentale, à savoir une demi-cavité de type « **halfraum** » avec l'échantillon positionné au fond [Cas10-2] (Fig. 1b). Ces expériences constituent les premières tentatives de mise en évidence expérimentale de la stabilisation hydrodynamique assurée par une structuration de l'**ablateur**. La première géométrie, entièrement originale, est le **feuilletage** qui consiste en une alternance de couches

These **indirect-drive** experiments were the first to use so-called rugby **hohlraums** (Fig. 1a), which is an original concept considered for **Inertial Confinement Fusion (ICF)** [Ame07, Ame08, Van07, Van08]. These **hohlraums** were used to characterize germanium-doped plastic, which is a potential **ablator** material for the **LMJ**, and as a test-bed for the validation of our numerical tools. A large amount of experimental results was obtained [Cas09].

Since 2007, experiments are carried out on the **Omega** laser facility with a new experimental platform consisting of a **halfraum** with the sample under study placed at the end [Cas10-2] (Fig. 1b). This configuration was the first attempt at proving experimentally hydrodynamic stabilization from structured **ablators**. The first geometry, is based

on **laminated ablators** consisting of alternating layers of doped and undoped plastic (Fig. 2) [Mas07]. The laminated structure works in the **ablation** region by locally increasing the transverse radiative diffusion, which stabilizes the **ablation** front instability. This enhancement of transverse diffusion is obtained while maintaining a 1-D flow, i.e., the laminated structure produces an anisotropic diffusion. Time-resolved observed trajectories of homogeneous and laminated foils are identical confirming the 1-D homogenization predicted by simulations. The stabilizing effect of the laminated structure is shown with side-on and face-on radiographies, which qualitatively demonstrate its efficiency. Modulations due to HDI (Rayleigh-Taylor spikes) are visible on a homogeneous foil whereas they are not observed with a laminated structure.

The second geometry to be considered is graded dopant that produces a gradation of the dopant fraction in the **ablator** which is obtained by the piling of several layers of plastic with more or less dopant [Haa05]. The principle of the graded dopant is not recent but, to be efficient, this geometry requires a precise definition of the constitutive materials of the **ablator**, namely their dopant fractions and their thicknesses. Experimental configurations explore the internal gradient (in contact with D-T) and the external gradient with initial perturbations located outside or buried into the sample. The sensitivity of the graded dopant to the **equations of state (EOS)** and the **hohlraum** produced spectrum predicted by numerical simulations was confirmed by experimental results. ●

finés de plastique dopé et de plastique non dopé (Fig. 2) [Mas07]. Le feuilleteage agit dans la zone d'**ablation** en augmentant localement la diffusion radiative transverse qui stabilise l'instabilité se développant au front d'**ablation**. Cette augmentation de la diffusion transverse est obtenue tout en conservant l'écoulement 1D, c'est-à-dire que le feuilleteage réalise une diffusion anisotrope. Les mises en vitesse relevées expérimentalement avec des plaques classiques et feuilletées sont identiques et valident ainsi l'homogénéisation 1D observée dans les simulations. L'effet stabilisateur du feuilleteage est mis en évidence avec les radiographies de côté et de face qui démontrent qualitativement l'efficacité du feuilleteage. Les modulations dues aux IHD (« doigts » de Rayleigh-Taylor) sont visibles avec une plaque homogène classique, tandis qu'elles n'apparaissent pas avec le feuilleteage. La seconde géométrie envisagée est le **gradient de dopant** qui réalise

une gradation du taux de dopage dans l'**ablateur** qui est alors constitué par un empilement de couches de plastique plus ou moins dopés [Haa05]. Le principe du gradient de dopant n'est pas récent, mais, pour être efficace, cette structuration nécessite une définition précise des matériaux constitutifs de l'**ablateur**, de leurs taux de dopant et de leurs épaisseurs.

Les configurations expérimentales explorent le gradient interne (au contact du DT) et le gradient externe avec des perturbations initiales localisées à l'extérieur ou à l'intérieur de l'échantillon. La sensibilité du gradient de dopant aux **équations d'état (EOS)** et au spectre de la cavité apparue dans les simulations est confirmée par les résultats expérimentaux. ●

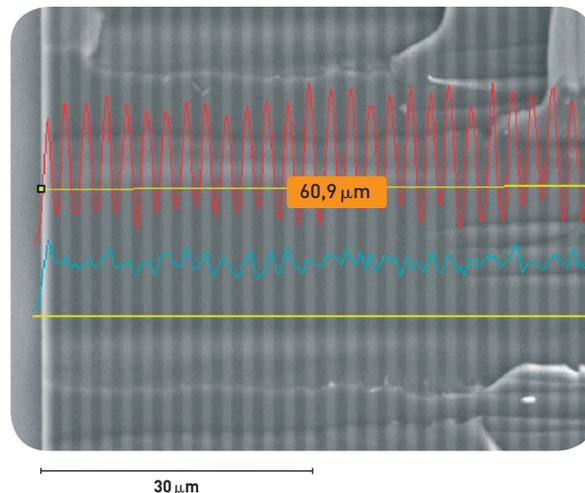


Fig. 2 : Vue de la tranche d'un échantillon feuillete réalisé par le CEA-Valduc [voir article 18]. Side view of a laminated sample realized by CEA-Valduc [see article 18].

M. PRIMOUT, F. GIRARD, D. BABONNEAU, L. JACQUET,
PH. STEMMLER, B. VILLETTE, J.-P. JADAUD, M. NAUDY,
S. DEPIERREUX, J.-L. ULMER

CEA - DAM - Île-de-France

P. DI-NICOLA

CEA - CESTA

F. DURUT

CEA - Valduc

K.B. FOURNIER, L.J. SUTER, O.L. LANDEN, S.H. GLENZER,
M.C. MILLER, R.L. KAUFFMAN, C.A. BACK, C. CONSTANTIN

LLNL

J.F. DAVIS

Almes & Associates, Virginia, USA

Sources X Multi-keV sur Omega de 2002 à 2010 : des feuilles pré-explosées aux cavités tapissées de métal

Pour les besoins de radiographie sur le LMJ, le CEA développe des sources « thermiques » de rayonnement X sur une plage d'énergie de photons entre 4 et 10 keV. Un schéma utilisé est l'émission X d'un plasma créé par l'irradiation d'une feuille métallique pré-explosée

par une impulsion laser puis chauffée par l'impulsion laser principale après un retard optimisé. Ces études menées de 2002 à 2004 sur l'installation Omega ont permis de mettre en évidence l'effet de la pré-impulsion sur le rendement de conversion de feuilles de Ti, Cu et

Ge. Une augmentation du rendement d'un facteur supérieur à 2 a été obtenu avec un retard de 4 ns entre la pré-impulsion et l'impulsion principale, par rapport au cas sans pré-impulsion [Gir03, Gir05, Pri05, Bab08].

Multi-keV X-ray Sources on Omega from 2002 to 2010: from pre-exploded foils to metal-lined hohlraums

For radiography purposes on LMJ, CEA is developing x-ray "thermal" radiation sources on the photon range from 4 to 10 keV. In the pre-exploded foil scheme, the emitting plasma is created by laser irradiation of a thin metallic foil and is heated by a main pulse after an optimized time delay. Experiments from 2002 to 2004 on the Omega facility have shown the effect of

a prepulse on the conversion efficiency of Ti, Cu and Ge foils. Enhancement of this efficiency by a factor of more than 2 was obtained with a 4-ns delay between the prepulse and the main pulse, compared to cases without prepulse [Gir03, Gir05, Pri05, Bab08]. Starting in 2005, x-rays sources studies into the multi-keV energy range for achieving kJ energy for few ns duration moved to me-

tal-lined cylindrical hohlraums [Pri08]. In these targets, a few micron-thick metallic layer is deposited on the inner wall of a plastic cylinder. During three campaigns on Omega the influence of the hohlraum diameter and length, of the laser pulse shape and the choice of metal, on the x-ray conversion efficiency was studied [Gir09]. Analysis was carried out with the FCI2 simulation code.

À partir de 2005, nos travaux sur les sources X multi-keV-kJ/ns se sont tournés vers des **cavités** tapissées de métal [Pri08]. Dans ces cibles, le métal, d'une épaisseur de quelques μm est déposé sur la paroi interne d'un cylindre de plastique. Au cours de trois campagnes réalisées sur **Omega**, nous avons étudié l'influence des dimensions de la **cavité**, de la forme et du niveau de puissance de la loi d'irradiation laser en complément de la nature du métal, sur le rendement de conversion X (Fig. 1) [Gir09]. Ces expériences ont fait l'objet d'un travail d'interprétation effectué avec le code de simulation FCI2. Pour le cas du titane, les taux de conversion calculés numériquement sont toujours inférieurs à ceux mesurés expérimentalement. Les différences entre expérience et simulation sont actuellement en cours

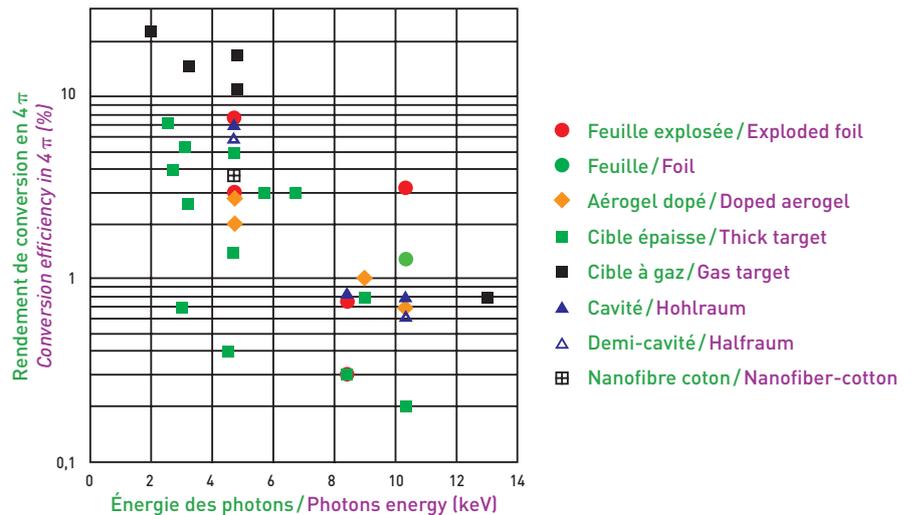


Fig. 1 : Rendements de conversion X multi-keV pour plusieurs types de cibles. Multi-keV x-ray conversion efficiency for several types of targets.

d'étude. Une campagne expérimentale a été spécialement dédiée à cette étude en 2009. Trois types de **cavités** ont été construites (titane (Fig. 2), cuivre et germanium) avec des diamètres et des énergies d'irradiation choisis pour obtenir un plasma métallique dans la **cavité** avec un état d'ionisation moyen

qui se situe, selon le matériau entre hydrogénéoïde et héliumoïde. Les effets du modèle de physique atomique **HETL** et l'introduction de processus à deux électrons sont les pistes les plus prometteuses pour comprendre les mécanismes mis en jeu dans le but d'améliorer nos outils de prédiction. ●

For titanium **hohlraums**, the calculated conversion efficiencies are always lower than the measured ones. In 2009 an experimental campaign was dedicated to understanding this discrepancy. Three kinds of targets (titanium (Fig. 2), copper and germanium) with various diameters and irradiation energies were chosen to obtain a metallic plasma in the **hohlraum** with ionization states between hydrogen-like and helium-like. The effect of **NLTE** atomic models and the introduction of two-electrons processes are promising ways to understand these operating mechanisms to improve our prediction tools. ●

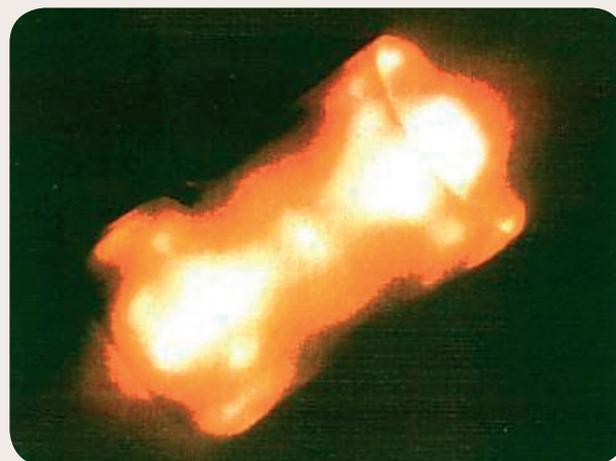


Fig. 2 : Images sténopées qui mesurent le rayonnement émis dans le domaine X durs (intégration temporelle) par une cavité cylindrique tapissée de titane irradiée des deux côtés. Time-integrated pinhole images of hard x-ray emission of a two-side-irradiated titanium-lined hohlraum.

Omega EP Preparation and First Shots (2008-2009)

Omega EP laser is a unique facility that is able to focus several kJ's of laser energy in a picosecond (ps) regime. The interaction of such high-intensity laser pulse ($I\lambda^2 > 10^{19} \text{ W.cm}^{-2} \mu\text{m}^2$, where λ is the wavelength of the incident laser expressed in μm) with a solid target leads to the generation of relativistic multi-MeV

electrons that can produce intense high-energy **bremstrahlung** emission when they propagate into a high-Z solid target. High-energy ($> 1 \text{ MeV}$) x-ray photon sources can be of interest for radiography applications, nuclear activation and fission, radiation effects and radiation safety studies.

The first high laser intensity shots on target were performed on **Omega EP** on December 11 2008 with the participation of a group from **CEA** who installed several diagnostics (penumbral imaging, dosimetry, radiography of objects, photo-nuclear reactions and **EMP** measurement) to characterize the generated MeV

La préparation et les premières expériences sur Omega EP (2008-2009)

Omega EP est une installation laser unique capable de délivrer sur cible des énergies supérieures au kJ dans un régime picoseconde (ps). L'interaction d'une impulsion de haute intensité ($I\lambda^2 > 10^{19} \text{ W.cm}^{-2} \mu\text{m}^2$ où λ est la longueur d'onde du laser incident exprimée en μm) avec une cible solide, conduit à la génération d'électrons relativistes qui produisent une émission X énergétique de type **Bremstrahlung** lorsqu'ils se propagent dans une cible de numéro atomique élevé. Cette source de photons de haute énergie

($> 1 \text{ MeV}$) peut être intéressante pour des applications de radiographie, pour les études sur l'activation et la fission nucléaire, sur les effets des rayonnements ionisants et en radioprotection.

Une première série de tirs sur cible s'est déroulée sur **Omega EP** le 11 décembre 2008 avec la participation d'une équipe du **CEA** venue pour mettre en œuvre des diagnostics (imagerie de pénombre, dosimétrie, radiographie d'objets, mesures d'**IEM** et de photo-réactions nucléaires) conçus pour caractériser

la source X. L'impulsion courte était focalisée sur des feuilles d'or d'épaisseur 20 ou 100 μm et délivrait jusqu'à 300 J en 0.6 ps ($\lambda = 1,053 \mu\text{m}$) ce qui correspond à une intensité de l'ordre de $I \sim 4 \times 10^{19} \text{ W.cm}^{-2}$ pour des tâches focales obtenues expérimentalement sur cible. Une seconde expérience à haute énergie laser (1 kJ, 8 ps, $1 \times 10^{19} \text{ W.cm}^{-2}$) a été réalisée en collaboration avec une équipe de l'**AWE** en mai 2009. La cible consistait en un cylindre de *Ta* de 2 mm d'épaisseur et de 2 mm de diamètre.

x-ray source. The short pulse laser (Backlighter) was focused on thin *Au* foils (20 or 100 μm thick) and delivered up to 300 J in 0.6 ps ($\lambda = 1.053 \mu\text{m}$) corresponding to a laser intensity of approximately $1\text{--}4 \times 10^{19} \text{ W}\cdot\text{cm}^{-2}$. A second experiment was performed in collaboration with a group from AWE in May 2009 at high laser energy (1 kJ, 8 ps, $1 \times 10^{19} \text{ W}\cdot\text{cm}^{-2}$). The x-ray converter targets consisted of 2-mm thick, 2-mm diameter *Ta* cylinders. Results from the first campaign show a larger x-ray source for the thinner foil (160 μm compared to 90 μm inferred from penumbral images) which could be explained by electron recirculation in the target. Analysis of radiographic images of a tungsten step wedge (Fig. 1a) (from AWE) and from an Image Quality Indicator IQI (Fig. 1b) (from CEA) obtained during the second experiment indicate that the x-ray source temperature is approximately 3.2 MeV and a source size less than 200 μm . Simulations performed with PIC (Calder) and Monte Carlo (MCNP) codes predicted similar dose levels, activity and x-ray spot-size. Additional experiments are planned to study the effect of a pre-pulse [Cou09]. ●



Les résultats de la première campagne montrent que la source X est plus large avec les cibles les plus fines (zone émissive d'un diamètre de $\sim 160 \mu\text{m}$ comparé à $90 \mu\text{m}$), s'interprétant par un effet de recirculation des électrons dans la cible. L'analyse des images de radiographie d'un coin échelonné en tungstène (Fig. 1a) (origine AWE) et d'un Indicateur de Qualité d'Image IQI (Fig. 1b) (origine CEA) obtenues lors de la seconde campagne indique une température du spectre d'énergie des photons d'environ 3,2 MeV et une taille de source inférieure à 200 μm . Des simulations numériques réalisées avec les codes PIC (Calder) et Monte Carlo (MCNP) prédisent des niveaux de doses et d'activité ainsi qu'une taille de source similaires. Des expériences complémentaires sont prévues à l'avenir pour étudier l'effet d'une pré-impulsion [Cou09]. ●

Fig 1: Images de radiographie du coin échelonné (a) et de l'IQI après tomographie (b) obtenues lors de la campagne à haute énergie. Radiographic images of the Tower of Hanoi (a), and of the IQI after tomography (b) obtained during the high energy laser regime experiment.

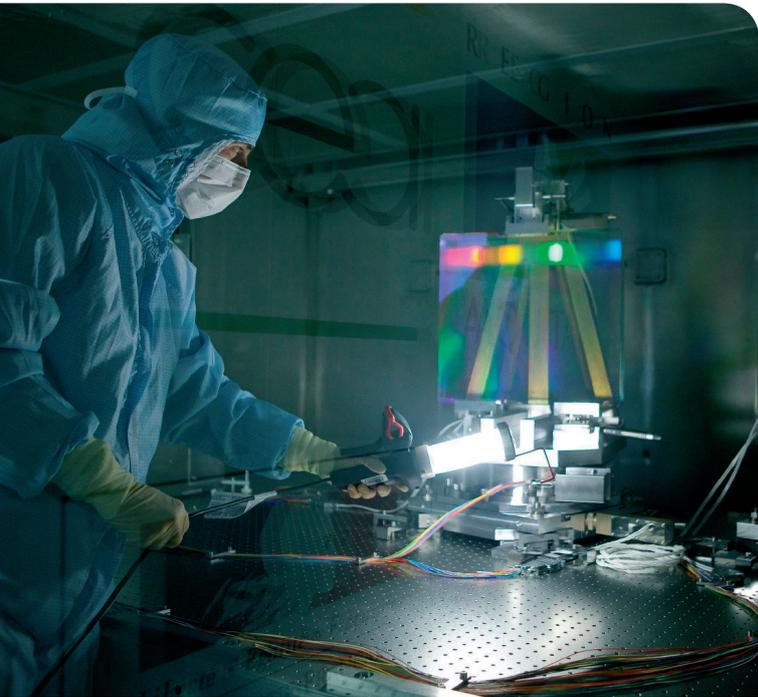


Fig. 1 : Réseaux du second étage de compression de Pétal dans le caisson de compression.
Second compression stage gratings for Petal in their vacuum chamber.

Omega EP et Pétal préparent HIPER

Le projet européen HiPER (High Power Laser Energy Research facility) [Dun06], actuellement financé dans sa phase préparatoire, vise à démontrer la faisabilité de la fusion par confinement inertiel (FCI) comme future source d'énergie. Les cibles à l'étude présentent un fonctionnement en deux temps, avec d'abord une compression à basse vitesse du combustible, puis le chauffage à 5-10 keV d'une partie de celui-ci pour initier les réactions de fusion. La compression est réalisée à l'aide d'impulsions laser énergétiques de plusieurs nanosecondes, tandis que le chauffage utilise soit un faisceau d'électrons relativistes produits par une impulsion pétawatt de forte énergie (Allumage Rapide, à une intensité $\sim 10^{19}$ W/cm²), soit

Omega EP and Petal towards HIPER

The European High Power Laser Energy Research facility (HiPER) project [Dun06], currently funded in the "Preparatory Phase," is dedicated to demonstrating the feasibility of Inertial Confinement Fusion (ICF) as a future energy source. A two-step concept is being studied in which the fuel in an ICF target is first compressed to high areal densities with a low implosion velocity and then a small region of this fuel is heated to 5-10 keV to initiate fusion burn. While compression is achieved with a high energy,

multi-nanosecond laser system, heating can be produced either by fast electrons generated by a high energy petawatt laser system (Fast Ignition at intensities of $\sim 10^{19}$ W/cm²), or by a high intensity "spike" at the end of the compression pulse (Shock Ignition at intensities of $\sim 10^{16}$ W/cm²). Because of the large mass of the imploded fuel in these targets, high gains are expected.

The Omega laser facility at LLE, currently operational, and the Petal laser facility, under construction at CEA/CESTA,

both using large gratings to compress the laser pulse (Fig. 1), represent an intermediate step in the evolution of high energy petawatt laser systems, from previous ~ 500 J, 500 fs systems to those required to demonstrate full-scale Fast Ignition. They will provide the physics basis for determining the optimal design for the HiPER project. The Omega laser facility consists of two laser systems: the 60-beam, 30 kJ (ultraviolet) Omega laser itself completed in 1995 and the Omega EP laser [Wax05] completed in 2008 (Fig. 2). The 60-beam configuration of the Omega laser system is sufficiently flexible to allow studies of fuel compression for both conventional and advanced ICF concepts. The Omega EP laser system includes four beam lines, each delivering 6.5 kJ at 351 nm to

un pic de puissance à la fin de l'impulsion de compression (**Allumage par Choc**, à $\sim 10^{16}$ W/cm²). Des gains élevés sont attendus de ces cibles qui mettront en œuvre des masses importantes de combustible.

L'installation **Omega** du **LLE**, actuellement en exploitation, et le laser **Pétal** en construction au **CEA/CESTA**, utilisant tous deux des réseaux de grande dimension pour comprimer l'impulsion laser (Fig. 1), appartiennent à une catégorie intermédiaire de lasers pétawatt de haute énergie, entre les systèmes de type ~ 500 J, 500 fs et ceux sur lesquels l'**Allumage Rapide** pourra être démontré à l'échelle 1. Cette génération intermédiaire validera notre compréhension de la physique et préparera HiPER dans les meilleures conditions. L'installation **Omega** comprend deux systèmes : **Omega** proprement dit, machine en service depuis 1995 dont les

60 faisceaux délivrent 30 kJ laser dans l'ultraviolet, et **Omega EP [Wax05]**, opérationnel depuis 2008 (Fig. 2). Sur **Omega** est étudiée la phase de compression du combustible pour les schémas conventionnels et avancés de **FIC**. **Omega EP** possède de son côté quatre faisceaux délivrant chacun 6.5 kJ à 351 nm dans une chambre d'expérience propre. Deux de ces faisceaux peuvent être comprimés temporellement pour produire à terme 2,6 kJ en 10 ps, à la longueur d'onde de 1 μ m. Ces faisceaux courts peuvent être transportés jusqu'à la chambre d'expérience d'**Omega** pour des expériences intégrées relatives à l'**Allumage Rapide** ou pour la radiographie de cibles de **FIC**.

Pétal est un laser multi-pétawatt qui délivrera des impulsions de 3.5 kJ dans des durées de 0.5 à 5 ps [Bla08]. Il sera couplé à des faisceaux laser nanosecondes, et

servira de banc d'essai pour le projet HiPER, tant pour la physique des plasmas que pour la technologie laser. Un effort important rassemble des chercheurs du **LLE**, du **CEA** et de nombreuses autres équipes autour de l'étude des schémas d'**Allumage Rapide** et d'**Allumage par Choc**. L'installation **Omega** est actuellement une plateforme de choix pour ces expériences, en attendant d'être bientôt complétée par **Pétal**. Au-delà de la **FIC**, d'autres thématiques associées à HiPER - comme l'astrophysique de laboratoire et l'étude des matériaux en conditions extrêmes - tireront parti de ces installations. L'expérience de production d'une source X multi-MeV conduite récemment sur **Omega EP**, et décrite ailleurs dans ce recueil (voir article 13), est un premier exemple de la nouvelle dimension que ces thématiques apportent à la collaboration entre le **LLE** et le **CEA**. ●

the **Omega EP** target chamber. Two of the beam lines use Chirped Pulse Amplification (CPA) to produce 2.6 kJ each at 1 μ m wavelength in a 10 ps pulse. This is the highest short pulse energy currently available worldwide. The CPA beam lines can be propagated into the **Omega** target chamber for integrated **Fast Ignition** studies or radiography of **ICF** targets.

The **Petal** laser facility is a high energy multi-petawatt laser that will generate pulses of up to 3.5 kJ energy with duration of 0.5 to 5 ps [Bla08]. This petawatt laser will be coupled with high power nanosecond lasers. **Petal** will demonstrate the physics and laser technology for HiPER. Scientists from **LLE** and **CEA**, and others from around the world, are

collaborating to develop both **Fast and Shock Ignition** as potential avenues for **Inertial Fusion Energy**. The **Omega** laser system is currently the primary experimental platform for this research, and **Petal** will play a significant role when it is completed. Other domains of the HiPER program, such as labora-

tory astrophysics and materials under extreme conditions studies, will benefit from these platforms. The high-energy radiation source experiments carried out on **Omega EP** and presented elsewhere in this issue (see article 13) are a first example that this new dimension brings to the **LLE-CEA** collaboration. ●



Fig. 2 : Hall laser d'Omega EP / Omega EP laser bay.

Credit photo : Eugene Kowalik (UR/LLE)

Properties of hydrogen/helium mixtures under deep planetary conditions

Attaining *in-situ* data, such as the H/He **equation of states**, from planets in our solar system provides key constraints on models of planets formation and solar systems origin. That is becoming of great current interest with the continuous discovery of extrasolar planets. But obtaining such data is an extremely difficult undertaking. Over the past decades, most of the data on the interior of Jupiter and Saturn have been obtained by the NASA space missions, like Voyager and Galileo. The Galileo entry probe inside Jupiter stopped returning data at a pressure of only 22 bars (outer layer),

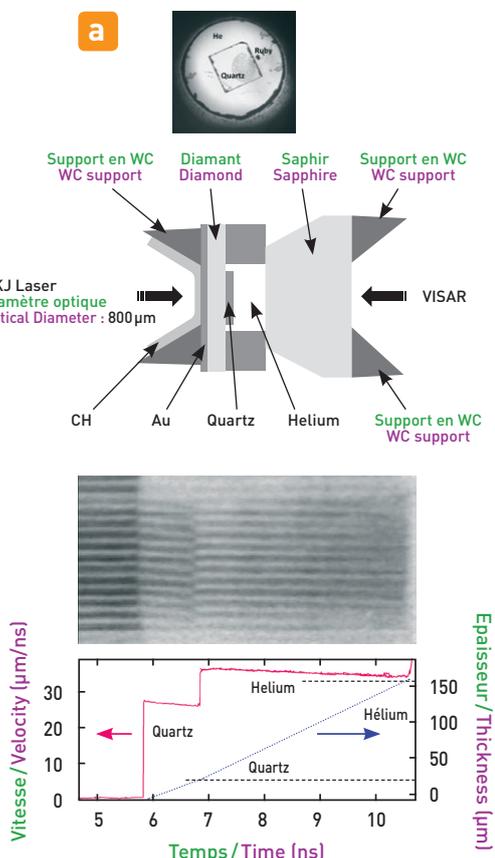
while most of the planet is at significantly higher pressure, in the range 100-4000 GPa (1-40 Mbars). Indeed, space missions are not fit to probe deep interior issues such as the existence or not of the phase separation of helium from metallic hydrogen. The aim of our **NLUF** project, which started in 2003, was to demonstrate that Laboratory experiments can also provide crucial data to model the interior structure of the planets and, by looking at deep planetary conditions, are thus very complementary to space missions. In particular, the project was to measure the **equation of state** of hydro-

gen and helium warm dense fluids and to quantify the miscibility gap in hydrogen/helium mixtures. The experiment is based on the concept of laser-shock compression of pre-compressed samples. This technique has been developed and optimized over the past 6 years through our group's efforts at **Omega** [Lou04, Jea07]. A sketch of the pre-compressed laser-shock targets is shown in Fig. 1, together with the orientation of the **VISAR** diagnostic which measures shock velocity. Fig. 1b presents a picture of the target shocked inside the **Omega** chamber is also shown. The pre-compressed tar-

Mesurer les propriétés des mélanges hydrogène/hélium dans les intérieurs planétaires

Il est fondamental d'obtenir des données sur les **équations d'état** des intérieurs planétaires pour contraindre les modèles de leur formation et de leur évolution. La récente découverte de nombreuses exoplanètes rend cette demande très prégnante. Mais l'obtention de ces données est extrêmement difficile. L'essentiel de notre connaissance a été fourni par les missions spatiales de ces dernières décennies, comme les sondes Voyager et Galileo. Le module d'entrée de Galileo a arrêté d'envoyer des

Fig. 1 : (a) Schéma de la configuration expérimentale (cible et image VISAR) utilisée pour les mesures de choc laser dans les cibles pré-comprimées. (b) Cliché d'un choc dans la chambre de Omega. (a) Schematic of the experimental configuration used for laser-shock measurements of pre-compressed targets. (b) Photograph of a shock experiment in progress in the Omega experimental chamber.



get offers two new opportunities over the usual cryogenic targets: *i*) mixtures of hydrogen/helium can be studied whereas they phase separate in a cryogenic targets; *ii*) the initial density of the mixture can be significantly increased, by a factor of 3 for a pre-compression at 3 GPa, which means that the associated **equation of state** probe much denser and cooler states. Hence, pressures of 200 GPa associated to temperature of 10,000 K have been achieved. That is really accessing the conditions of deep Jupiter and Saturn.

About 140 shots have been devoted to this project (Fig. 2). Half of them have given valid data but all were useful to progress. Over the years, the design of the target has been changed three times, essentially to couple more beams, to avoid **EMP** problems and to achieve higher pre-compression. A metrology based on quartz, as an *in-situ* reference material, has also been developed to give accurate **equation of state**, temperature and reflectivity data. Three sets of data are now complete and are being published in a sequence of increased complexity : the helium data set has just been published [Egg08,Cel10] ; the hydrogen one is in preparation and the H₂/H_e one will come after. We believe that this collaboration has been very successful certainly because the laser **Omega** has been an extremely efficient facility and the technical support from **LLE** extremely helpful. ●

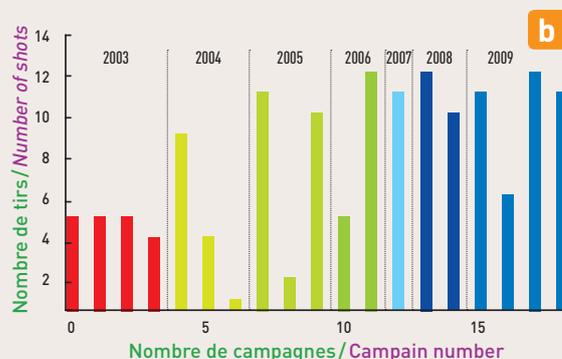
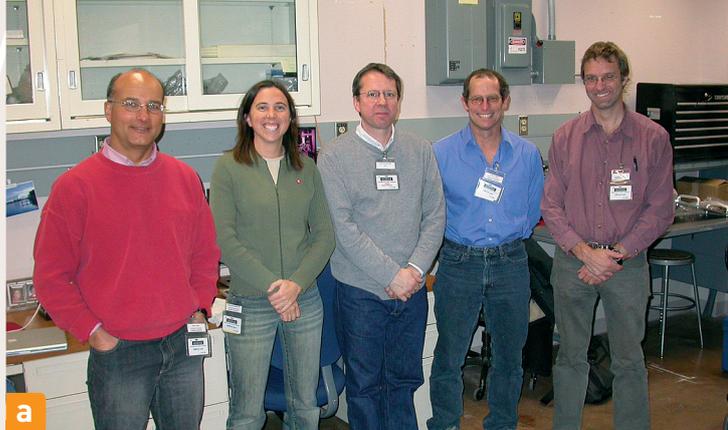


Fig. 2 : (a) Photographie du groupe lors d'une campagne de tirs. De gauche à droite : Peter Celliers, Stéphanie Brygoo, Paul Loubeyre, Rip Collins et Jon Eggert. (b) Historique des campagnes de tirs : année et nombre de tirs obtenus pour chaque campagne sur Omega. (a) Photograph of the team during one of the campaigns. From left to right : Peter Celliers, Stéphanie Brygoo, Paul Loubeyre, Rip Collins and Jon Eggert. (b) Chronology of collaborative shock campaigns: year and number of shots per campaign on Omega. ●

données lors de son largage dans Jupiter pour une pression de 22bars, soit dans la couche externe, alors que l'essentiel de la masse de celle-ci est à une pression de 100-4000 GPa (1-40Mbars). Les missions spatiales ne peuvent donc pas explorer les intérieurs planétaires. Notre collaboration, débutée en 2003, a pour ambition de montrer que des expériences de laboratoire permettent de mesurer les propriétés de la matière constituant l'intérieur des planètes, et sont donc très complémentaires des missions spatiales. Plus spécifiquement, notre projet scientifique à l'aide du laser **Omega** est de quantifier la miscibilité des mélanges hydrogène/hélium dans Jupiter et dans Saturne. Du temps de faisceau **NLUF** sur le laser **Omega** a été alloué trois fois à ce projet. Notre approche repose sur le concept de chocs laser dans les cibles pré-comprimées [Lou04,Jea07]. Un schéma de principe du dispositif expérimental est montré sur la Fig. 1. Le diagnostic principal pour nos mesures

est le **VISAR** qui permet de réaliser une mesure de vitesse de front de choc résolue en temps et spatialement. La Fig. 1b montre une de nos cibles lors d'un choc. Les cibles pré-comprimées sont particulièrement intéressantes dans notre projet pour deux raisons: *i*) cela permet l'étude des mélanges hydrogène/hélium, ce qui est impossible avec une cible cryogénique car le mélange initial est démixé; *ii*) la densité initiale peut être fortement augmentée, d'un facteur trois par rapport à une cible cryogénique avec une pression autour de 3 GPa, ce qui permet de mesurer l'**équation d'état** dans un domaine plus dense et plus froid du diagramme de phase. Nos mesures ont ainsi atteint des pressions de 200 GPa associées à des températures de 10000 K. Cela permet d'atteindre les conditions réelles de l'intérieur profond de Jupiter et Saturne.

140 tirs laser ont été effectués durant toutes ces années sur **Omega** (Fig. 2). La moitié ont

permis l'acquisition de données, mais tous ont été utiles pour progresser. Le schéma de définition des cibles a été modifié 3 fois, principalement pour coupler plus de faisceaux, pour éviter de générer trop d'**IEM**, et pour atteindre des pré-compressions plus grandes. Une métrologie, basée sur le quartz, a été calibrée et a permis des mesures relatives très précises d'**équation d'état**, de température et de réflectivité. Trois jeux de données ont été constitués et sont maintenant publiés dans un ordre de complexité croissante de la physique mesurée : l'hélium vient d'être publié [Egg08,Cel10]; l'hydrogène est en préparation et les mélanges hydrogène/hélium viendront ensuite. Le succès de cette collaboration doit beaucoup à l'efficacité de l'équipe du laser **Omega**, à la fiabilité de cette installation, à la confiance des comités de programme **NLUF** qui nous ont donné trois fois de suite du temps de faisceau et enfin à la très bonne ambiance de travail de notre groupe. ●

J.-L. BOURGADE, J. RAIMBOURG, J. BAGGIO, H.-P. JACQUET, S. DARBON,
L. DISDIER, S. GIRARD, S. BAZZOLI, J. GAZAVE, M. BARBOTIN, D. BRÉBION
CEA - DAM - Île-de-France

J.-C. GOMME
CEA - CESTA

P. JAANIMAGI, V. GLEBOV, G. PIEN, C.T. SANGSTER, C. STOECKL, W. SHMAYDA
University of Rochester - LLE

J.L. LERAY
CEA - Cabinet du Haut Commissaire

R.A. LERCHE
LLNL



Fig. 1 : Hall expérimental d'Omega et les mesures de vulnérabilité de composants CEA (en médaillon) - mai 2004.

Experimental area on Omega and vulnerability measurements of CEA components (see lower-left insert) in May 2004.

Études de vulnérabilités des diagnostics sous rayonnements nucléaires

Les plasmas thermonucléaires créés par le LMJ ou le NIF induiront un environnement nucléaire très hostile aux mesures. L'étude de ces perturbations sur tous les composants de nos diagnostics nécessaires à cette mesure, permet d'en déterminer leur degré de vulnérabilité. Les parasites les plus intenses sont produits soit par des photons qui couvrent tout le spectre électromagnétique (des ondes radios aux gammas en passant par tout le domaine des rayons X) soit par des neutrons issus des réactions de fusion (jusqu'à quelques 10^{18} produits en cas d'inflammation thermonucléaire soit environ 10 MJ d'énergie). Toutes ces particules se propagent et diffusent, en quelques centaines de ns, dans tout le hall d'expérience (HE). Omega était l'installation laser la plus performante au monde lors de cette dernière décennie (Fig. 1), capable de produire assez de neutrons en attaque directe (jusqu'à 10^{14}) pour induire sur tous nos capteurs actuels l'ensemble des phénomènes parasites à un niveau mesurable et permettre ainsi leur extrapolation au

niveau de celui qui sera atteint pour le LMJ [Bou04]. Dès 2000, le détecteur de l'imagerie neutronique, qui était installé dans le HE d'Omega [Dis03], a servi de révélateur à cette problématique d'étude en permettant, dans la zone de localisation du capteur, vierge de toute image, de bien caractériser l'effet direct de ces rayonnements parasites sur la chaîne d'acquisition d'image utilisée.

Le champ électromagnétique rayonné a aussi été mesuré dans un large domaine fréquentiel jusqu'à plusieurs GHz tant à l'intérieur qu'à l'extérieur de la chambre d'expérience [Rai04]. Depuis 2001 nos expériences de vulnérabilités sont embarquées dans un TIM (Fig. 2a), pour être exposées sur la plupart des campagnes produisant des neutrons, à proximité (25-50 cm) de la source d'Omega (flux équivalent à 5 m d'une source neutron de 10^{16} du LMJ). Elles nous ont permis de caractériser les parasites induits sur de nombreux dispositifs nécessaires à nos mesures (câbles coaxiaux [LLE03], fibres optiques, composants électroniques ou

optoélectroniques, maquettes EMINeM [Ler08] (Fig. 2b)). Des chaînes complètes d'acquisition et de traitement d'images largement utilisées en routine sur nos expériences actuelles comme les caméras à balayage de fente, les films, les CCD, les tubes intensificateurs, les écrans phosphores ou les optiques standards ont également été exposés lors de ces tirs sur Omega pour en caractériser leurs réponses sous rayonnement (Fig. 1). Toutes ces mesures nous ont permis de bien cerner les domaines de validité d'utilisation des premiers diagnostics du LMJ basés sur les technologies existantes [Bou08-1] et de commencer à en envisager de nouvelles [Bou10-2].

Enfin ces études, qui sont extrapolables à tout type de plasmas thermonucléaires, ont permis de confronter les mesures et les palliatifs envisagés avec nos collègues de la fusion magnétique d'ITER au cours d'un premier workshop international consacré à cette problématique de vulnérabilité [Bou08-2]. ●

Diagnostics Vulnerability Studies under Nuclear Radiations

NIF and LMJ thermonuclear plasmas will create a hostile nuclear environment for our measurements. The study of these perturbations on the diagnostics components required for these measurements, allowing their degree of vulnerability to be determined. The most intense parasitic effects are produced either by photons over the whole electromagnetic spectrum (from radio waves to gamma rays), or by neutrons emitted from fusion reactions (up to several 10^{18} produced by thermonuclear ignition, or an energy of about 10MJ). These particles propagate and are scattered during hundreds of ns over the entire experimental hall (EH). **Omega** was the world most powerful facility of this past decade (Fig. 1), and was able to produce enough neutrons (up to 10^{14}) in **direct drive** mode to create these parasitic effects at a measurable level on all of the CEA sensors. These measurements can be extrapolated to levels that will be reached on **LMJ** [Bou04]. As far back as 2000, the neutron imaging detector that

was installed in the **Omega** EH [Dis03], had shown evidence of these problems, thus making it possible to characterize exactly, in the image-free areas of its sensor, the background level induced by this parasitic flux on the image acquisition chain.

The electromagnetic fields have been measured over a large frequency range up to few GHz, both inside and outside the target chamber [Rai04]. Since 2001, vulnerability diagnostics have been inserted into a **TIM** (Fig. 2) to be exposed during high yield neutron campaigns, close (25-50 cm) to the **Omega** source (corresponding to a 10^{16} yield for a **LMJ** detector at 5 m). They have allowed the parasitic induced effects on a number of devices to be characterized (coaxial cables [LLE03], optical fibers, electronic and optoelectronic components, **EMINeM** experimental set-ups [Ler08]). Entire image acquisition and processing chains, largely and routinely used in our present experiments such as **streak**

cameras, films, **CCD** cameras, amplifier tubes, phosphors screens or standard optics, have been exposed during the high yield **Omega** shot campaigns to characterize their response to nuclear radiation (Fig. 1). All these measurements have allowed us to better understand the limits in the fielding of the first **LMJ** diagnostics based on existing technologies [Bou08-1], and to start considering new ones (see article 10-2).

These studies, which can be applied to any type of thermonuclear plasma, have allowed us to compare with our **ITER** magnetic fusion colleagues the measurements and solutions under consideration during a first international workshop devoted to the problems of vulnerability [Bou08-2]. ●



Fig. 2 : Montage d'étude de la vulnérabilité et ses équipements en tests.
(a) Dans les mains de Jean-Luc Bourgade. (b) Avant son insertion dans un TIM (mai 2009).
Vulnerability experimental device and set of detectors.
(a) In Jean-Luc Bourgade's hands. (b) Before insertion into a TIM (May 2009).

**OMEGA FACILITY AND CEA TARGETS
CAD MODELLING
MODÉLISATION CAO DE L'INSTALLATION
OMEGA ET DES CIBLES CEA**

J.-L. ULMER, J.-L. BOURGADE, R. MARONI, F. AUBARD
CEA - DAM - Île-de-France
G. PIEN, W.J. ARMSTRONG, M. FOX, J. MATHER
University of Rochester - LLE

**CEA DATA ACQUISITION SYSTEM
FOR OMEGA EXPERIMENTS
SYSTÈME D'ACQUISITION DE MESURES
DU CEA POUR LES EXPÉRIENCES SUR OMEGA**

M. BARBOTIN, S. CHICHE, D. BRÉBION, L. DISDIER,
J.-L. BOURGADE, O. LANDOAS, J. DOUBLIER
CEA - DAM - Île-de-France
T. HINTERMAN, G. PIEN, T. BRANCATO, B. ROMBAUT,
J. WYATT, B. KINGERY, A. SHECHTER
University of Rochester - LLE

Experiments Planning and Acquisition

The small number of CEA experimental campaigns on Omega (around one a year for each experimental goal) requires them to model very precisely in advance and to use a top level and reliable acquisition system for all our measurements.

Omega facility and CEA targets CAD modeling

10 years of collaboration with numerous information exchanges (drawings or blue prints, partial CAD models...) between CEA and LLE mechanical designers teams, have led the CEA to reconstruct numerically piece by piece quite accurately a large part of the Omega experimental hall (Fig. 1a). This virtual CAD object is easy to visualize in 3D and is used to check mechanical interferences issues into this very tight environment.

This object can be used for other calculations (as for example for neutron activations calculation...). Each experimental campaign on Omega needs to first CAD modeled including all the elements of each target with all the beam paths and diagnostics lines of sight (Fig. 1b). This numerical virtual object is improved step by step along the planning phase to design the best target supports, backlit foils or other objects (screens). This numerical

mock-up is useful for verifying laser beam pointing. Any mechanical interference can be solved in advance and the real target views obtained on the Omega TVS are calculated and stored into the Omega pre-shot database. TVS reticules can be generated. This numerical mock-up is a virtual but almost actual view of the target at each step of its preparation. After the shot, this virtual mock-up is archived in order to represent the shot target. ●

Préparation et acquisition des expériences

Le nombre de campagnes expérimentales du CEA peu fréquent sur Omega (environ une par an par thème expérimental donné), impose une modélisation préalable très poussée par CAO de l'ensemble du hall expérimental d'Omega et des cibles mais aussi un système d'acquisition des mesures fiable et performant.

Modélisation CAO de l'installation Omega et des cibles CEA

En 10 ans de collaboration de nombreux échanges d'informations (plans, maquettes numériques partielles...), entre les bureaux d'études du CEA et du LLE, ont permis la saisie informatique par le CEA de

l'ensemble de données disponibles, pour aboutir à la réalisation d'une maquette numérique assez complète du hall d'expérience pour les besoins de modélisation du CEA (Fig. 1a). Cet objet virtuel, facilement

manipulable à partir d'une console informatique, permet de visualiser l'installation en 3 dimensions et appréhender les contraintes d'environnement. Elle est indispensable pour vérifier les interférences avec les ob-



Fig. 1 : Maquettes CAO de l'installation Omega (a) - disponible au CEA - et d'une cible CEA tirée sur Omega (b). CAD models of Omega facility (a)- available at CEA - and of a CEA target (pre-shot) on Omega

Fig. 2 : (a) Système portable d'acquisition Sigma sur Omega EP en 2010. (b) Les systèmes d'acquisition de Dante (premier plan) et Sigma (arrière plan) implantés à « la cave » d'Omega (1999).

(a) Movable acquisition system on Omega EP (2010). (b) Dante (foreground) and Sigma (background) acquisition systems at Omega "la cave" (1999).



CEA Data Acquisition System for Omega experiments

Sigma is a data acquisition system specifically conceived and developed in 1998 by the French "FPE" group for command and control of the **DMX** [Bou01] and **NIS** [Dis10] diagnostics used on the **Omega** facility (Fig. 2b). For **DMX**, the system consists of 14 (from 20 initially) high bandwidth (7 GHz) single shot IN700 oscilloscopes [Gft10] coupled with Microsoft Windows based computers for data ac-

quisition. Oscilloscopes are remotely set a few seconds before the laser is fired and the raw data is recovered immediately afterward and stored into a dedicated data base. The acquisition process is triggered by messages from the **Omega** facility's control software. For **NIS**, the same control scheme is used with another part of the same data acquisition system coupled to a **CCD camera**. The diagnostics can be run simultaneous-

ly. This system works equally well for different types of experiments (**CVD** [Lan10], **EMP** [Bou10-2], etc.). **Sigma** uses the same control software in all cases. A mobile and simplified version of **Sigma** has been used on the **Omega EP** system (Fig. 2a) since 2009 for **EMP** experiments, as well as on the **Gekko XII** facility in Osaka, Japan and **LULI**. ●

jets déjà existants dans un environnement restreint. Ce fichier peut également être utilisé à des fins de calculs annexes (activation neutronique...). Chaque expérimentation sur **Omega** requiert au préalable l'établissement d'une maquette numérique de la cible, ses éléments associés, ainsi que les trajets précis des faisceaux et visées diagnostics (Fig. 1b). Cette maquette, mise au point progressivement tout au long de la conception, permet de concevoir la structure même de la cible, les sources de radiographie ou objets secondaires (caches). Elle permet aussi de vérifier les pointés théoriques des faisceaux. Les conflits éventuels rencontrés sont résolus en avance, les vues depuis les diagnostics plasma sont anticipées et mémorisées. Elle permet aussi de générer les réticules de positionnement sur les visus des télémicroscopes d'alignement. Cette maquette formalise l'objet cible à ses différents stades d'évolution. Après finalisation de l'expérience, la maquette permet d'archiver la configuration telle que réalisée. ●

Système d'acquisition de mesures du CEA pour les expériences sur Omega

Sigma est le système d'acquisition de mesure spécialement conçu et développé en 1998 par l'équipe française de la **FPE** pour le contrôle-commande des diagnostics **DMX** [Bou01] et **NIS** [Dis10] sur l'installation **Omega** (Fig. 2). Pour **DMX**, il se compose principalement de 14 (sur les 20 initialement présents) oscilloscopes monocoup à large bande passante (7 GHz) de type IN7100 [Gft10] et d'un système informatique avec des PC sous système d'exploitation Windows pour l'acquisition des données de mesures. Les oscilloscopes sont armés à distance quelques secondes avant les tirs puis leurs données sont restituées et ensuite archivées dans une base de données immédiate-

ment après les tirs. Ces opérations sont automatiquement déclenchées par les messages envoyés aux PC par l'installation **Omega**. Pour **NIS**, il se compose de la **caméra CCD** et d'une autre partie du même système d'acquisition, qui fonctionne selon le même principe. Ces deux diagnostics peuvent être mis en œuvre simultanément sur les mêmes tirs. Les expérimentations peuvent également être de nature différente (**CVD** [Lan10], **IEM** [Bou10-2]...). Le même logiciel est utilisé dans tous les cas. Le système **Sigma**, dans une version simplifiée et mobile, est également utilisé aujourd'hui sur l'installation **Omega EP** (mesures de l'**IEM**) (Fig. 2a), ainsi que sur **Gekko XII** (Osaka, Japon) et **LULI**. ●

R. COLLIER, O. LEGAIE, S. BEDNARCZYK, R. BOTREL,
O. BRETON, A. CHOUX, F. DURUT, C. DAUTEUIL,
L. JEANNOT, G. LEGAY, B. RENAUME, M. THÉOBALD
CEA - Valduc

M. BONINO, D. HARDING
University of Rochester - LLE

J. FOOKS
General Atomics, San Diego, CA



Développements des cibles CEA pour Omega

Depuis une décennie, le CEA a développé, fabriqué et livré plus de 500 cibles variées à l'installation Omega. Les nombreuses thématiques laser étudiées et abordées dans les articles précédents [Cho04] ont nécessité d'acquérir un savoir-faire important en termes de fabrication d'éléments de cibles, mais aussi d'assemblage et de mise en œuvre. Par ordre chronologique, les cibles pour l'étude de la conversion X, constituées de sphères en plastique recouvertes d'un métal, ont conduit à

Fig. 1 : Cible d'étude des instabilités hydrodynamiques.

Cette cavité est remplie de néopentane. Un des trous d'entrée laser est recouvert par une membrane CH_xGe (matériau de l'ablateur du futur microballon LMJ) sur laquelle un profil sinusoïdal a été réalisé (1 μm d'amplitude et 50 μm de période).

Study target of hydrodynamic instabilities.

The hohlraum has been filled with neopentane. One of the laser entrance holes is covered by a CH_xGe membrane (ablator material of the future LMJ microballoon) over which some sinusoidal grooves have been manufactured (1 μm of amplitude and 50 μm period).

CEA Target Developments for Omega

For a decade, CEA has developed, produced and delivered more than 500 various targets to the Omega facility. Many of the laser experiments mentioned in previous articles [Cho04] have allowed the development of important expertise in target component fabrication and, their assembly and implementation. In chronological order, targets for study of x-ray conversion,

composed of plastic spheres coated by metal have led to the development of new techniques of vacuum deposition, and depending on the case, electrochemical deposition. The study of hydrodynamic instabilities required the manufacture of controlled and repetitive patterns either on the surface or at the interface between two materials (typically 1- μm amplitude

sinusoids with a 50- μm period), over a large spectrum of materials. The fabrication of controlled shapes required the use of new technologies to meet the specifications, including machining by an excimer laser (mask projection technique), a femtosecond laser, and a diamond turned lathe (Fig. 1). X-ray hohlraum conversion, part of many experiments on Omega, are often

développer de nouvelles techniques par dépôt sous vide associées, selon les cas, à des dépôts électrochimiques. L'étude des instabilités hydrodynamiques nécessite de fabriquer sur une surface ou à l'interface entre deux matériaux, des motifs maîtrisés et répétitifs (comme typiquement une sinusoïde d'amplitude de $1\ \mu\text{m}$ pour une période de $50\ \mu\text{m}$) sur un large spectre de matériaux. La réalisation de ces formes maîtrisées a impliqué la mise en oeuvre de nouvelles technologies nécessaires pour atteindre les spécifications requises, notamment l'usinage par laser à excimères (technologie par masque), le laser femtoseconde et l'usinage d'ultra-précision (Fig. 1). Les **cavités de conver-**

sion X utilisées dans les nombreuses thématiques sur **Omega** sont souvent composées d'un bicouche (or enrobé d'un plastique) ou parfois d'autres éléments (titane, cuivre, germanium) de très faibles épaisseurs (quelques micromètres). Une succession de techniques spécifiques (polymérisation, usinage, dépôt sous vide, démandrinage) ont été mises au point pour réaliser ces cavités avec succès, en particulier dans le cas des sources multi-keV. Parmi les thématiques récurrentes, l'étude de la symétrie d'implosion requiert ces dernières années les cibles à température ambiante les plus complexes réalisées actuellement par le **CEA** : assemblage

de demi-cavités bicouches or/polymère étanches au gaz et contenant une capsule **CH**, elle-même étanche à un mélange D_2/argon de quelques dizaines de bars. Des développements importants ont été nécessaires pour garantir, à l'aide de couches anti-perméation adaptées, un faible taux de fuite du microballon compatible de la mise en oeuvre de la cible en centre chambre (Fig. 2). Les technologies et le savoir-faire développé depuis plus de 10 ans au **CEA** et en particulier pour les études expérimentales réalisées sur **Omega**, à l'image dernièrement des cavités « rugby », permettent de préparer les futures cibles du programme du **LMJ**. ●

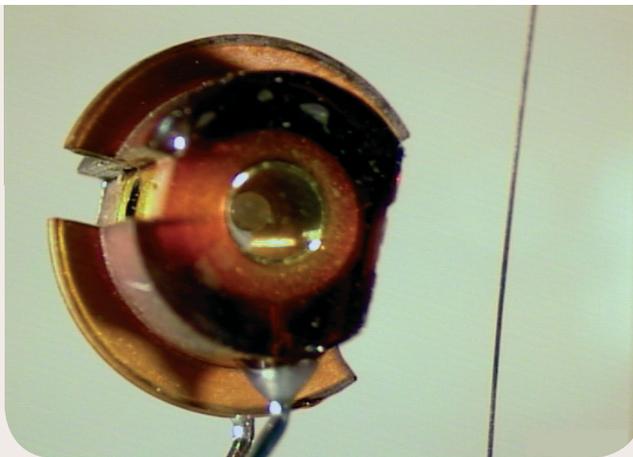


Fig. 2 : Cible d'étude de la symétrie d'implosion [comparée à un cheveu]. Cette cavité en deux parties assemblées est remplie de néopentane. Au coeur de la cavité, un microballon (dia. 0.5 mm), lui-même rempli d'un mélange D_2/argon , est centré à moins de $\pm 25\ \mu\text{m}$.
Study target of implosion symmetry [compared to a single hair]. The hohlraum in two assembled parts has been filled with neopentane. At the center of the hohlraum, a microballoon (dia. 0.5 mm), which is filled by a mixture of D_2/argon , and has been centered in the hohlraum to better than $\pm 25\ \mu\text{m}$.

composed of two layers (plastic coated gold) or sometimes of very small thicknesses (a few micrometers) of others elements (titanium, copper, germanium). A succession of specific techniques (polymerization, machining, vacuum deposition, mandrel removal) have been successfully implemented in the manufacture of these **hohlraums** and, particularly, for the multi-keV

sources. Among recurring experiments, the study of implosion symmetry has required the most complex room temperature targets produced by **CEA**: assembling of double layer gold/polymer, gas-tight **hohlraums** containing a **CH** capsule that is impermeable to ten bars of D_2/Ar mixture. Important developments were required to guarantee, thanks to appropriate thin an-

ti-permeation layers, a low gas leak of the microballoon compatible with the set-up time of the target at the center of the chamber (Fig. 2). Technologies and the know-how developed for more than 10 years in **CEA**, especially for the experimental studies carried out on **Omega**, for example the recent "rugby" **hohlraum**, have paved the way for future targets for the **LMJ** program. ●

Assembly, Metrology, and Delivery of Standard Targets for Omega Laser Facility

The **CEA - CESTA** has been involved for 10 years in the assembly and delivery of targets for high power experiments on the **Omega** laser facility [Hus09, Cas09]. **CESTA** is responsible for the design and development of the mechanical components, of the micro-assembly and metrology of the target assembly, and of transportation to **Omega** (Fig. 1). From **CESTA's** point of view; the first stage of a target campaign is the reception of the **CAD** drawings of

the experimental sub-assembly. **CAD** drawings are essential for the validation of the **target assembly** to meet the physicist requirements. The target request form sent by the investigator contains all of the necessary information (specifications, tolerances, plasma diagnostics required...). The experimental sub-assembly provided by **CEA - Valduc** is sent to **CEA - CESTA** after acceptance testing. Once the structural elements are defined, ordered and received by **CESTA** the

metrology-assembly iterative process begins using means specific to **CESTA**. Once all the **target assembly** is in accordance with the specifications then an acceptance test is conducted with the investigator for final approval. The last stage is to arrange the air shipping of the **target assembly** in dedicated containers and, in most cases, to check the target sub-assembly integrity on the **Omega** facility.



Fig. 1 : Exemple des boîtes de transport des cibles Omega avec M. Bonino.
Example of Omega targets transport boxes with M. Bonino.

Assemblage, contrôle et mise en œuvre des cibles standards pour Omega

Le **CEA - CESTA** participe, depuis 10 ans, à la mise en œuvre de cibles sur le laser **Omega** [Hus09, Cas09]. Le **CESTA** est en charge des conceptions et de la réalisation de la structuration mécanique, de l'assemblage et de la métrologie des **édifices cible** ainsi que de leur transport vers **Omega** (Fig. 1). L'élément initiateur d'une campagne cible, du point de vue du **CEA - CESTA**, est la réception de la maquette numérique (**CAO**). Elle permet de proposer, un projet d'**édifice-cible**

comprenant notamment les éléments de structuration et de mesures compatibles aux objectifs définis par les physiciens concepteurs. Le dossier de définition transmis par le demandeur contient les éléments significatifs (spécifications, tolérances, éléments de métrologie, diagnostics Omega utilisés...). Le sous-ensemble expérimental est fabriqué au **CEA - Valduc** et envoyé au **CEA - CESTA** après recette. Les pièces de structuration sont définies, commandées et réception-

The mounting of **Omega** targets require assembly benches equipped with motorized stages (translation and rotation), a binocular microscope and viewing cameras (Fig. 2). Specific software ensures the control of the motors and helps with the assembly process by superimposing software generated objects over the sub-assembly images provided by the cameras. In the course of the past 10 years, numerous assembly techniques have been implemented: assembly with screws, **cyanoacrylate glue, epoxy resin, UV glue**, self-adhesive spider silks...

The metrological control is done with a **Powellscope** especially designed for **Omega** targets. This optomechanical instrument has 5 degrees of freedom and two monocular telescopes with a large depth of field coupled to **CCD** cameras. Specific software performs the equipment control as well as a “preview function” to properly position the target in front of the objective to be able to observe it from a beam or diagnostic location.

The Target Fabrication Group of **Rochester University** is also equipped with a **Powellscope** that is consistent with the tools and methods used by the **CEA** teams in the French and American laboratories. The overall **CESTA** activities on **Omega** over the last 10 years have led to the manufacturing and delivery of around 500 targets for which 1,000 assembly-metrology cycles and 10,000 metrologies have been undertaken. ●

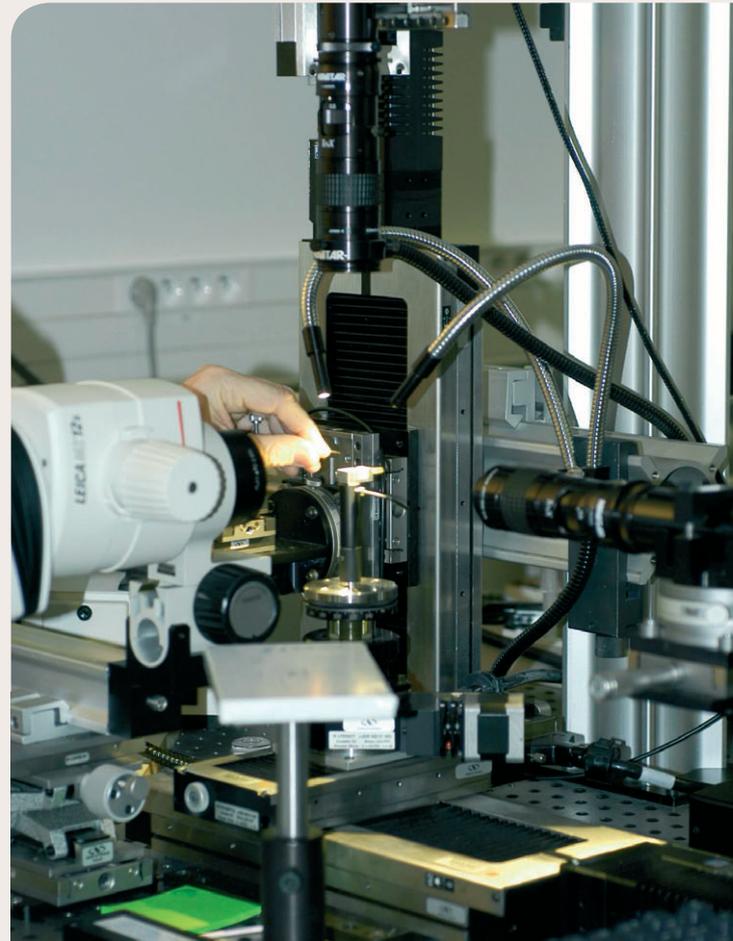


Fig. 2 : Bancs d'assemblage équipés de platines motorisées (translation et rotation), d'une binoculaire et de caméras de visualisation.

Assembly benches equipped with motorized stages (translation and rotation), binocular microscope and viewing cameras.

nées par le **CESTA**. Le processus itératif d'assemblage-métrieologie peut alors débiter à l'aide des moyens spécifiques du **CESTA**. Lorsque l'ensemble des **édifices-cibles** d'une campagne sont conformes aux spécifications, une recette avec le demandeur est réalisée en vue de son acceptation finale. Les dernières étapes consistent à organiser le transport par avion des édifices (containers dédiés), et dans la plupart des cas, la mise en œuvre les cibles sur l'installation **Omega**.

La réalisation d'une campagne sur **Omega** met en œuvre des bancs d'assemblage équipés de platines motorisées (translation et rotation), d'une binoculaire et de caméras de visualisation (Fig. 2).

Un logiciel spécifique assure le contrôle des motorisations et offre une assistance à l'assemblage en superposant aux images des sous-ensembles des figures géométriques calibrées. Au cours de ces 10 années, de nombreuses techniques d'assemblage ont été mises en œuvre : assemblages par vis, par **colle cyanoacrylate, résine époxy, colle UV** ou par soies d'araignée autocollantes...

Le contrôle métrieologie est réalisé avec le **Powellscope**, conçu spécialement pour les cibles destinées au laser **Omega**. Cet ensemble optomécanique est constitué de 5 degrés de liberté et de 2 monoculaires à grande profondeur de champ. Un logiciel spécifique réalise le pilotage

de l'équipement ainsi que la fonction de « prévisualisation » qui permet d'orienter la cible face à l'objectif de façon à l'observer à la place d'un diagnostic ou d'un faisceau laser.

Le Laboratoire Cibles de l'**Université de Rochester** est aussi doté d'un **Powellscope**, ce qui assure une cohérence des outils et des méthodes de contrôle réalisé par les équipes du **CEA** dans les laboratoires français et américain. L'ensemble des activités sur **Omega** de ces 10 dernières années a conduit à la fabrication et la livraison d'environ 500 cibles pour lesquelles 1 000 cycles assemblage-métrieologies et 10 000 métrieologies ont été effectués. ●

Fabrication et métrologie de miroirs et polariseurs hautes performances pour le LMJ

Le groupe de fabrication optique (Optical Manufacturing Group) du LLE a procédé à la réalisation et la caractérisation de traitements multi-diélectriques pour les besoins du **Laser Mégajoule (LMJ)** du CEA. Plusieurs contrats de qualification technique ont porté sur le traitement par évaporation sous vide (Physical Vapor Deposition - PVD) de miroirs à haute réflectivité et de polariseurs à fort contraste avec des spécifications sévères en termes d'uniformité spectrale, de qualité de surface d'onde ou encore de tenue au flux laser. Ces traitements, réalisés sur la période 2007-2008, satisfont les critères essentiels demandés. Les performances du traitement multidélectrique du polariseur sont reportées sur la Fig. 1 : la transmission en lumière polarisée p et le rapport de contraste dépassent tous deux les exigences photométriques sur la bande passante angulaire d'intérêt.

En 2009, ce Groupe a collaboré avec le CEA à la mise au point d'un traitement réfléchissant par technologie PVD, pour le miroir déformable « M1 » du LMJ. Cette approche constitue une alternative potentielle à la technologie actuelle de traitement sol-gel (chimie douce en solution). Le haut rapport d'aspect du miroir M1 constitue un véritable défi pour répondre aux exigences de qualité de surface d'onde. En effet, la technologie PVD impose de maîtriser le niveau des contraintes mécaniques résiduelles présentes dans le dépôt multicouche qui détermine la courbure finale du composant traitée et impacte directement la qualité de surface d'onde aux grandes périodes spatiales (> 10 mm). La collaboration a porté sur la définition des conditions opératoires du procédé

de traitement LLE pour minimiser le niveau des contraintes induites d'une part, et conserver un comportement en compression d'autre part. Des échantillons témoins (verre BK-7) ont été réalisés pour évaluer les contraintes de traitements réalisés dans trois configurations opératoires différentes. Les résultats encourageants attestent qu'un processus peut être optimisé mais il reste encore un écart de comportement entre les petits échantillons témoins et le produit final à l'échelle 1 qui nécessite une analyse plus approfondie. Le traitement PVD présenterait des avantages en terme de maintenance des optiques

(facilité de nettoyage, durabilité à long terme). Toutefois, ces qualités doivent être mises en balance avec la courbure finale (Power) du composant traité et l'écart final du front d'onde qui peut être toléré et rectifié grâce aux corrections locales du miroir déformable. L'Optical Manufacturing Group (Fig. 2) pourra également collaborer sur les dépôts multidélectriques pour les impulsions courtes, pour la conduite d'essais comparatifs sur l'endommagement laser, ainsi que pour les dépôts de composants optiques du LMJ. ●

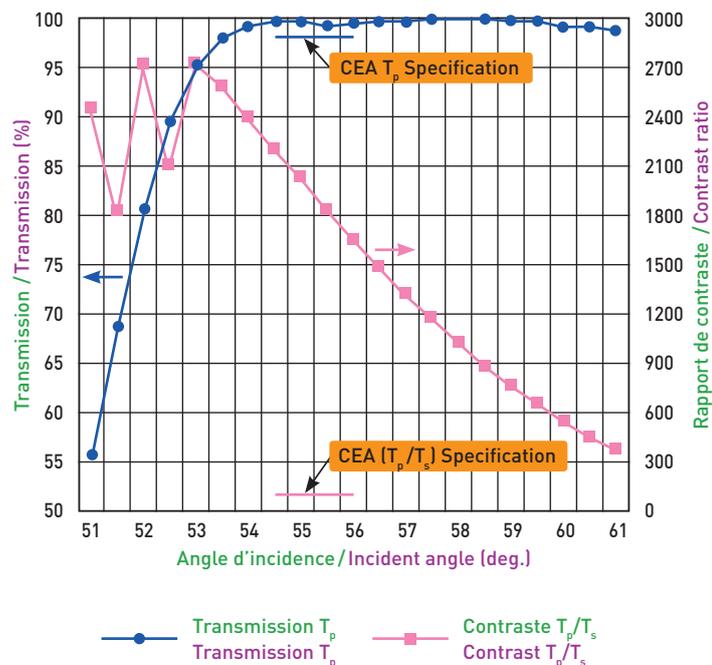


Fig. 1 : Transmission en lumière polarisée p (T_p) et contraste T_p/T_s d'un polariseur LMJ traité PVD. Transmission of p -polarized light (T_p) and T_p/T_s contrast ratio of a PVD-coated LMJ polarizer.

Fabrication and Metrology of High Performance Mirrors and Polarizers for LMJ

The Optical Manufacturing Group at LLE has processed several optical components for the **Laser MegaJoule (LMJ)** project at **CEA**. Several technical qualification contracts were focused on the manufacture of high reflectivity mirrors using vacuum vapor deposition (Physical Vapor Deposition-PDV) and high-contrast polarizers with stringent spectral, wave-front, uniformity and laser damage threshold specifications. These coatings were manufactured in 2007 and 2008 and met the essential criteria. The coated polarizer performance is shown in *Fig. 1*; both the transmission of *p*-polarized light and the contrast ratio exceeded photometric requirements over the specified angular bandwidth.

In 2009, the Optical Manufacturing Group collaborated with **CEA** on the manufacture of an electron-beam deposited dielectric deformable mirror coating as an alternative to the sol-gel coated high-reflector technology used to date. The high aspect-ratio of the optical component makes it a challenge to meet wave-front requirements due to the coating stresses from the e-beam process, which results in a predominant power term in the peak-to-valley wave-front error. The collaboration focused on tuning the **LLE** coating process to minimize the stress in the BK7 glass used. Witness samples were used to monitor and predict coating stress under three coating conditions. The results were en-

couraging and indicated that a process could be optimized but there was some discrepancy between the small witness samples and the full-scale product that requires further evaluation. The benefit of a PVD coated part could be a better ease of maintenance (ease of cleaning, long term durability). These benefits will be weighed against the ultimate wave-front error that can be allowed and self-corrected with the deformable mirror stroke. The Optical Manufacturing Group (*Fig. 2*) looks forward to future collaborations on short-pulse coating manufacture and damage testing comparisons as well as support for **LMJ** coated optical components. ●



Fig. 2 : Équipe de collaboration CEA/LLE pour les revêtements optiques laser haute performance. CEA/LLE collaboration team for high performance laser coatings.

Glossaire / Glossary

Les laboratoires et les installations lasers Laboratories and laser facilities

AWE : Atomic Weapons Establishment, Aldermaston, UK.

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

CESTA ou/ou CEA-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 installed.

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

DIF ou/ou CEA-DIF : Centre Île-de-France de la Direction des applications militaires (DAM) du CEA, dans lequel sont réalisés les définitions et les calculs des cibles de FCI et les définitions et les activations des diagnostics pour les études d'interaction laser-matière.

One of the centres within CEA French Military Applications Division, where ICF target design and modelling are performed, and diagnostics design for laser-matter interactions are designed and activated.

DOE : Department of Energy, USA.

DRT : Direction de la recherche technologique du CEA.
French Technologies Research Division within CEA.

DSM : Direction des sciences de la matière du CEA.
Basic Sciences Research Division within CEA.

Gekko XII : 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 1053 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 (1053 nm) and 10 kJ at 3 ω .

IRFU : Institut de recherche des lois fondamentales de l'Univers rattaché à la Direction des sciences de la matière (DSM) du CEA.
Institute of Universe fundamental laws attached to the Basic Sciences Research Division (DSM) within CEA.

ITER : International Thermonuclear Experimental Reactor.

LANL : Los Alamos National Laboratory, Los Alamos, New Mexico, USA.

Ce laboratoire utilisait autrefois des lasers CO₂. Après l'abandon de ces derniers, le LANL a réalisé des expériences sur Nova au LLNL et en réalise, en collaboration, sur Omega, à l'Université de Rochester. Il développe des diagnostics pour le NIF comme l'imagerie neutronique ou les mesures des rayons gamma.

This laboratory used in the past CO₂ lasers. Once these came to a stop, LANL took to perform experiments on Nova at LLNL, and still now other joint experiments on Omega within collaborations with Rochester University. It is currently involved in the design of the neutron imaging system and some gamma ray detectors for NIF.

Laser Mégajoule (LMJ) / Megajoule Laser :

Ce laser doit être mis en service à l'horizon 2014 sur le centre du CEA-CESTA, près de Bordeaux. Ses 176 faisceaux (jusqu'à 240 si besoin), regroupés en 44(60) quadruplets, transporteront au total une énergie de 1,8 MJ pendant 20 ns. Il sera dédié au programme Simulation. Des expériences de physique des plasmas y seront réalisées dans le cadre de collaborations scientifiques internationales.

This laser facility is to be commissioned in 2014 at CEA-CESTA near Bordeaux in France. Its 176 laser beams (240 if need be), gathered in 44(60) quadruplets, will deliver a 1.8 MJ total energy during 20 ns. It will be devoted to the Simulation programme. Plasmas physics experiments will be performed with international scientific collaborations.

Ligne d'Intégration Laser (LIL) / Laser Integration Line :

Mise en fonctionnement en mars 2002 pour la partie laser, puis en décembre 2005 pour les expériences d'interaction laser-matière, la LIL est le prototype du LMJ. Elle est l'équivalent, avec tous ses faisceaux, de l'une des 30 chaînes du LMJ. Elle a produit 7,5 kJ en 5,6 ns à une longueur d'onde de 350 nm, avec un faisceau.

Commissioned in March 2002 for the laser facility and in December 2005 for laser-matter interaction experiments, LIL is the prototype of LMJ. With all its beams, it is equal to one of the 30 LMJ lines. One single beam has supplied 7.5 kJ energy during 5.6 ns (at 350 nm).

Limeil-Valenton : ancien centre de la Direction des applications militaires (DAM) fermé en 1999. Il a hébergé de nombreuses installations laser telles que P102, Octal et Phébus. C'est sur le même centre, en 1969, que le laser L5 a conduit, pour la première fois, à l'observation des neutrons de fusion thermonucléaire à partir de cibles constituées de bâtonnets de deutérium solide.

One of the former centres within CEA French Military Applications Division dismantled in 1999, where numerous laser facilities such as P102, Octal and Phebus were installed. In this place, in 1969, the L5 laser facility led to the observation of first thermonuclear fusion neutrons from solid deuterium sticks.

LIST : Laboratoire d'intégration des systèmes et des technologies de la Direction de la recherche technologique (DRT) du CEA.

Technologies and Systems Integration laboratory within the CEA Technological Research Division.

LLE : Laboratory for Laser Energetics, University of Rochester, New York, USA.

Ce laboratoire de l'Université de Rochester a conçu le laser Omega, principalement pour des expériences en attaque directe. Il réalise aussi des expériences d'attaque indirecte en collaboration avec plusieurs autres laboratoires.

This laboratory within the University of Rochester has designed the Omega laser, mainly for direct drive experiments. It is also in charge with indirect drive joint experiments with some other laboratories.

LLNL : Lawrence Livermore National Laboratory, Livermore, California, USA.

Ce laboratoire américain a longtemps utilisé le laser Nova pour faire des expériences en attaque indirecte. Il met actuellement au point le NIF (National Ignition Facility) prévu pour atteindre l'ignition. This US laboratory has been running the Nova laser for a long time to perform indirect drive experiments. It is presently developing the NIF (National Ignition Facility) that is designed to reach ignition.

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 Commissariat à l'Énergie Atomique et de l'Université Paris VI. C'est un centre de recherche académique en Physique des Plasmas à Haute Densité d'Énergie (HEDP), plus précisément en interaction laser-matière à haute énergie en régimes nanoseconde et picoseconde, et un très grand équipement national depuis 1975.

Laboratory for the use of intense lasers. LULI is a joint research unit (UMR No. 7605) under administrative supervision of the CNRS, the Ecole Polytechnique, the CEA and the University of Paris VI. It is a center for academic research in Plasma Physics at High Energy Density (HEDP), specifically in laser-matter interaction at high energy nanosecond and picosecond regimes, and a great national team since 1975.

MIT : Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Massachusetts, USA.

NIF : National Ignition Facility.

Installation laser hébergée sur le site du LLNL prévue pour atteindre, comme le LMJ, un gain thermonucléaire de 10, dans les années à venir.

Laser facility located at LLNL, and designed to reach such as LMJ, a thermonuclear gain of 10 in years to come.

NLUF : National Laser User Facility.

NNSA : National Nuclear Security Administration

Nova : Ce laser du LLNL, arrêté en 1999, délivrait 30 kJ en 1 nanoseconde à une longueur d'onde de 350 nm, avec 10 faisceaux de 700 mm de diamètre. The LLNL laser, once shutdown in 1999, used to deliver 30 kJ in energy in 1 ns (at 350 nm), with ten 700 mm diameter beams.

Omega : C'est l'installation laser faisant l'objet de la collaboration entre le CEA et le DOE et de la publication de ce recueil. Cette installation, hébergée par l'Université de Rochester, aux États-Unis, délivre actuellement jusqu'à 30 kJ en 1 ns, à une longueur d'onde de 350 nanomètres avec 60 faisceaux. Cette géométrie lui a permis d'obtenir une bonne uniformité d'éclairement en attaque directe, et d'atteindre le record de quelques 10¹⁴ neutrons produits lors d'une expérience d'implosion.

This is the laser facility implied in the CEA/DOE collaboration and publication of this booklet. This facility, located in the University of Rochester in USA, delivers at present thanks to 60 beams up to 30 kJ in energy in 1 ns (at 350 nm). This geometry has allowed it to reach a very uniform direct drive irradiation, and the record of few 10¹⁴ neutrons produced on an implosion experiment.

Omega EP : Opérationnelle depuis la mi 2008, cette installation se compose de 4 chaînes laser de puissance de 40 cm de côté (2 classiques en régime nanoseconde à 3 ω et 2 à 1 ω munies de compresseurs sous vide permettant leur conversion en impulsion ps). Grâce à un jeu de miroirs, les deux impulsions «ps» peuvent soit être focalisées dans une chambre spécifique placée dans un hall expérimental attenant à Omega soit dirigée sur celui d'Omega en les rendant colinéaires. La focalisation est dans les deux cas assurée par des paraboles hors axe placés dans les chambres d'expérience respectives.

Operational since mid-2008, it is composed of four 40 centimeters square power laser beams (2 conventional ones in 3 ω and ns regime and 2 in 1 ω equipped with vacuum compressors allowing their conversion into ps pulses). Thanks to mirror set, both ps impulsions can be either focused in a specific chamber located in an experimental hall next Omega, or pointed at the Omega hall by making them collinear. Focusing is in both cases ensured by out-of-axis parabolas, located in the respective experimental chambers.

Pétal/Petal : Cette installation, en cours de construction au CEA-CESTA, comportera 1 faisceau laser de puissance de 40 cm de côté en régime ps (entre 0,5 et 5 ps) à 1 ω ou 2 ω . L'énergie maximale délivrée sera de 3,5 kJ à 1 ω .

This laser facility under construction at CEA-CESTA will be composed of one 40 centimeters square power laser beam in the ps regime (between 0.5 and 5 ps) at 1 ω or 2 ω . It will deliver up to 3.5 kJ energy at 1 ω .

Phébus/Phebus : Installation laser du CEA/Limeil-Valenton, démantelée en 1999. Elle comportait 2 faisceaux délivrant au total 20 kJ en lumière infrarouge et 5 kJ en lumière ultraviolette. La plupart des expériences ont été réalisées en attaque indirecte.

Laser facility within CEA/Limeil-Valenton, once dismantled in 1999. It was composed of 2 beams

delivering a total 20kJ in infrared (IR) and 5kJ in ultraviolet (UV) light. Most experiments have been performed in indirect drive configuration.

Université de Rochester / University of Rochester : Université de l'Etat de New York hébergeant le Laboratory for Laser Energetics (LLE) et son laser Omega.

University within New York State including the LLE (Laboratory for Laser Energetics) and Omega laser facility.

Valduc ou/or CEA-Valduc : Centre de la Direction des applications militaires (DAM) du CEA, dans lequel sont réalisées, pour grande partie, les cibles pour les études d'interaction laser-matière. One of the centres within CEA French Military Applications Division, mostly devoted to target fabrication.

La 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 stop with the consequent explosion inside the whole target.

Ablateur / Ablator : Matériaux vaporisés par l'irradiation laser intense et responsable de son accélération centripète lors de l'implosion.

Materials vaporized by intense laser irradiation and responsible for its centripetal acceleration during its implosion.

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 surface 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 implosion. This shock, caused by laser impulsion intensity final peak, leads to an increase in temperature at the central hot spot which starts up fusion reactions.

Allumage rapide / Fast ignition : Schéma de fusion par confinement inertiel associant une compression du combustible par des faisceaux nanosecondes et la création du point chaud à l'aide d'une impulsion picoseconde de forte énergie. L'énergie de cette seconde impulsion est absorbée sous la forme d'un faisceau d'électrons relativistes près de la densité de coupure, électrons qui se propagent ensuite dans le combustible pour créer le point chaud dans la région dense.

Inertial confinement fusion scheme associating fuel compression by nanosecond laser beams with the hot spot created by a high energy picosecond pulse. The energy of the picosecond pulse is absorbed in the shape of a relativistic electron beam close to the critical density, electrons propagating afterwards into the fuel to create the hot spot in the dense region.

Attaque directe / Direct drive : Les faisceaux lasers éclairent directement la paroi de la cible à imploder.

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 de 150eV, sur Phébus, à 350eV sur le LMJ. Ce rayonnement X éclaire la cible à imploder 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 150eV on Phebus, and 350eV on LMJ. This x-ray irradiates the centered capsule to implode it. This configuration contributes to a better implosion uniformity.

Cavité de conversion / Hohraum : 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.

Cocktail (cavité) / cocktail (hohlraum) : Mélange binaire ou ternaire à fraction variable d'or, d'uranium voire d'autres matériaux (bore, terres rares). Binary or ternary mixture with variable fraction of gold, uranium or other materials (boron, rare earth elements).

Combustion : L'énergie transportée par les particules α , créées dans les réactions de fusion, crée une onde thermonucléaire qui augmente la température et conduit à la combustion autoentretenu du milieu fusible.

The energy produced by fusion reaction α particles, creates a thermonuclear wave that increases temperature and causes released combustion of fusible medium.

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.

Halfraum : demi-cavité irradiée d'un seul côté, utilisée sur Omega par le LLNL et/ou le CEA.

Half-hohlraum irradiated on only one side used on Omega by LLNL and/or CEA.

<pR> : La masse surfacique, communément appelée <pR>, désigne le produit moyen de la densité ρ par le rayon R de la sphère contenant le mélange fusible deutérium-tritium (DT). Ce paramètre joue un rôle fondamental en FCI puisqu'il est relié au taux de combustion (défini par le rapport entre le nombre de fusions produites et le nombre d'ions initiaux). Ainsi, pour atteindre des taux de combustion élevés, il est nécessaire d'obtenir des masses surfaciques (et donc des densités) élevées.

The areal density commonly called <pR>, stands for the mean product of density ρ by radius R of the sphere containing the deuterium-tritium (DT) mixture. Such a parameter plays a key role in ICF since it is linked to the combustion rate (defined as the ratio of fusion number and the initial ions number). Hence, for reaching high combustion rates, one needs obtaining elevated areal density values.

Interaction laser-matière et diagnostics Laser-matter interaction and diagnostics

Activation : a) Technique de mesure nucléaire consistant à mesurer la décroissance radioactive d'isotopes produits sous irradiation neutronique d'un matériau. b) Phénomène nucléaire conduisant à la création de noyaux.

a) Nuclear technique based on the measurement of isotope decay produced by neutron irradiation of a material. b) Nuclear phenomenon leading to nuclei production.

Bremsstrahlung : Synonyme de rayonnement de freinage qui est un rayonnement électromagnétique à spectre large créé par le ralentissement de charges électriques dans un milieu matériel.

Bremsstrahlung emission corresponding to a large spectrum electromagnetic radiation which is created by the slowing-down of electric charges in a material medium.

CAO / CAD : Conception Assistée par Ordinateur. Computer-Aided Design.

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.

Caméra CCD / CCD camera : Caméra à l'état solide permettant la captation et la numérisation des images dans le domaine visible. Elle est composée d'une électronique associée à une matrice de pixels.

Solid-state camera aimed at image capture and digitalization in the visible range. It is composed of electronics coupled with a pixel matrix.

CH : Classe de plastique utilisé pour les ablateurs composés uniquement de chaînes polymérisées hydrocarbonées.

Category of plastic used for ablaters composed only with hydrocarbonated polymer chains.

CHGe ou/or CH:Ge : Classe de plastique dopé par du Germanium.

Category of plastic doped with Germanium.

Colle cyano crylate / Cyanoacrylate glue : Colle fluide à prise rapide.

Flash set fluid glue.

Colle UV / UV glue : Colle avec durcissement obtenue après exposition à lumière UV.

Hardening glue under UV irradiation.

CVD : La technique CVD (en français Dépôt chimique en phase vapeur) consiste à placer un substrat de diamant dans une chambre dans laquelle sont injectés de l'hydrogène et du méthane chauffés par des micro-ondes. Les deux gaz se transforment en plasma et se déposent sur le substrat, formant une couche de diamant qui croît avec le temps (environ 500 μm par jour).

The CVD (Chemical Vapour Deposition) is a chemical process based on setting a diamond substrate (wafer) in a chamber filled with micro-wave heated hydrogen and methane. Both gases turn into plasma, and deposit on the substrate as a diamond layer, which increases in time (about 500 μm a day).

Dante ou/or DMX : Spectromètres à rayons X développés respectivement par LLNL et par le CEA, utilisant une technique de filtration pour sélectionner une large bande du spectre et effectuer une

mesure résolue temporellement (~100 ps) à l'aide d'une diode à vide sensible au rayonnement X. L'adjonction d'un miroir utilisé à incidence rasante (< 10°) est parfois nécessaire (surtout dans les bandes spectrales les plus basses < 1 keV) pour éliminer la tendance intrinsèque des filtres à redevenir transparent à plus haute énergie. DMX par exemple comporte plus de voies à miroirs que son homologue américain Dante.

X-ray spectrometers developed in LLNL and CEA respectively, using a filtering process to select a wide spectrum range, and perform a time-resolved measurement (~100 ps) with an x-ray sensitive vacuum diode. The addition of a mirror in glancing incidence (< 10°) is sometimes necessary (especially on the lowest spectral band < 1 keV) to prevent filters at higher energy to specifically turn transparent again. For example DMX has a larger number of mirrored channels than its US homologue Dante.

DEMIN - D'etecteur Micromegas pour les Neutrons : détecteur développé par le CEA/DIF et le CEA/Saclay pour mesurer les instants d'arrivée des neutrons pris individuellement sans être perturbés par les rayonnements gammas associés.

Detector specially developed by CEA/DIF and CEA/Saclay to measure the arrival time of the individual neutrons without being perturbed by the associated gamma rays.

Densité critique / Critical density (n_c) : Densité électronique jusqu'à laquelle une onde électromagnétique peut se propager dans un plasma. Highest electron density up to which an electromagnetic wave can propagate into the plasma.

Diffusion Raman Stimulée / Stimulated Raman Scattering (SRS) : Mécanisme de couplage résonnant à trois ondes dans lequel l'énergie de l'onde laser incidente est en partie cédée à une onde électromagnétique (principalement rétrodiffusée) et aux modes propres plasma électroniques. Three wave resonant coupling mechanism, in which the incident laser wave energy is partly transferred to an electromagnetic wave (mainly backscattered), and to the electronic plasma own modes.

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).

Édifice-cible / Target flag (assembly) : Structure complète composée de la cible des éléments de structuration et de l'interface avec le porte-cible. Complete structure composed of the structure element target, and the interface with the target-positioner.

EMINeM : Équipement de Mesure des Interactions Neutron Matière. Equipment for Measuring Interaction of Neutrons with Matter.

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.

FPE : Force de projection d'enregistrement. Recording projection force.

HETL/NLTE : Les plasmas d'ions multichargés rencontrés en astrophysique ou en laboratoire peuvent être dans un état thermodynamique où l'équilibre thermodynamique local (ETL) n'est pas assuré. On parle alors d'hors équilibre thermodynamique local (HETL).

Multi-charged ions plasmas encountered in astrophysics or in laboratory may not be in Local Thermodynamic Equilibrium (LTE). One then talks about Non Local Thermodynamic Equilibrium (NLTE).

HRXI : Acronym for High Resolution X-ray Imager.

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 paramétriques, rétrodiffusion / Parametric instabilities, backscattering : 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 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 in 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, and Brillouin backscattering from an ionic mode.

IEM/EMP : Impulsion électromagnétique, plus connue sous le nom EMP de l'anglais « electromagnetic pulse », qui désigne une émission d'ondes électromagnétiques brève et de très forte amplitude. EMP (ElectroMagnetic Pulse) refers to a short and very high amplitude emission of electromagnetic waves.

Gasbag : Membrane très fine en plastique, en forme de ballon, contenant un gaz. Ultra thin, gas-filled plastic balloon-like membrane.

«La cave» : Vaste «domaine» bas de plafond situé sous le hall expérimental d'Omega et protégé des radiations nucléaires par 70 cm de béton.

Large low-ceilinged «domain» located in the basement of Omega target hall and protected against nuclear radiations by 70 cm-thick concrete.

Maitre d'Œuvre d'expérimentation (MOE) / Principal Investigator (PI) : Responsable de la conception et de la réalisation des expériences. Véritable chef d'orchestre, il coordonne l'ensemble des actions (cible, laser, diagnostics, traitements...) qui concourent à la réussite des expérimentations laser le jour J. Pour les tirs sur Omega il est désigné sous le vocable «PI» (Principal Investigator).

Supervisor of design and performing experiments, he coordinates the whole process (target design, laser, diagnostics, processing...), that contributes to the success of laser experiments on shot day. For Omega shots he is called PI (acronym of Principal Investigator).

NIS (Neutron Imaging System) : Système développé spécifiquement par le CEA/DIF pour imager l'émission neutronique d'un cœur de fusion sur Omega.

System specifically developed by CEA/DIF to image a fusion core neutron emission on Omega.

nTOF (neutron Time Of Flight) : Technique consistant à mesurer l'énergie des neutrons par leurs temps de vol entre l'instant de leur création et leur détection à distance.

Process based on selecting neutron energy using their time of flight between their emission time and the detector located far away.

Pack neutron / Neutron pack : Ensemble de diagnostics neutroniques du LMJ permettant de mesurer le flux neutronique, la température ionique et l'instant de production des neutrons.

LMJ neutron diagnostics set aimed at measuring neutron yield, ion temperature, and neutron bang time.

Plasmon / EPW : Onde plasma électronique. Electronic plasma wave.

POWELLSCOPE : Instrument de métrologie à 5 degrés de liberté dédié à l'examen de la conformité des cibles Omega.

5-degree free motion measuring device designed for Omega targets survey prior a shot.

Rétrodiffusion Raman / Raman backscattering : Les plasmas créés par interaction laser-matière sont le siège de fluctuations qui créent des inhomogénéités de densités électronique ou ionique. Ces inhomogénéités constituent des ondes plasmas électroniques (plasmons) ou acoustiques ioniques (phonons) qui se comportent comme un réseau face au faisceau laser incident et diffusent la lumière, principalement dans la direction d'incidence. Cette lumière rétrodiffusée est appelée Raman ou Brillouin selon le type d'ondes, électroniques ou ioniques respectivement, qui entrent en jeu.

The laser-matter interaction plasmas include fluctuations that generate differences in electron and ion density. These form electronic (plasmons) or acoustic and ionic plasma (phonons) waves that behave like a grating facing the incidence laser beam, and scatter light, mainly in the incidence direction. This backscattered light is called Raman (electrons) or Brillouin (ions) according to the kind of waves involved.

Résine époxy / Epoxy resin : Colle polymérisable par assemblage de deux composants. Polymerizable glue made by the combination of two components.

Sigma : Système d'acquisition de mesure spécialement conçu et développé par le CEA pour le contrôle-commande des diagnostics DMX et NIS. Measurement acquisition system especially designed and developed by CEA for DMX and NIS diagnostics control-command.

TIM (Ten Inch Manipulator) : Dispositif développé par le LLE permettant d'introduire dans la chambre d'Omega et Omega EP les diagnostics nécessaires à une mesure. Le LLE en dispose de 6 pour chaque installation. Device developed by LLE in order to introduce the diagnostics in Omega and Omega EP experiment hall. LLE has 6 of them for each device.

TVS : Acronym of Target Viewing System for the Omega target chambers.

VISAR - Velocity Interferometer System For Any Reflector : Vélométrie laser par interférences (nécessite la présence d'une surface réfléchissante).

Laser interferometer velocity (requires a reflecting surface).

3 ω : Conversion à la fréquence triple de l'harmonique fondamental du laser (pour le laser Néodyme à 1 064 nm cette conversion délivre un faisceau laser à la longueur d'onde de 350 nm -proche UV).

Triple frequency conversion of the laser fundamental harmonic (for Neodyme laser at 1 064 nm, such a conversion delivers a 350 nm wavelength -near UV-laser beam).

3/2 ω : L'onde électromagnétique émise à cette fréquence est caractéristique de l'instabilité à deux plasmons. La fréquence 3 ω /2 résulte de la diffusion de l'onde laser sur les ondes plasma électroniques stimulées par l'instabilité deux plasmons au voisinage de la densité $n_c/4$.

The electromagnetic wave emission at such a frequency is characteristic of the two plasmon decay instability. This 3 ω /2 frequency is produced by the scattering of the incident laser wave on the electron plasma waves stimulated by the two plasmon decay instability close to the density layer at $n_c/4$.

Références / References

- [Ame95] Amendt P. *et al.*, *Rev. Sci. Instrum.*, **66**, p. 785 (1995).
- [Ame07] Amendt P. *et al.*, *Phys. Plasmas*, **14**, 056312 (2007).
- [Ame08] Amendt P. *et al.*, *Phys. Plasmas*, **15**, 012702 (2008).
- [Bab08] Babonneau D. *et al.*, *Phys. Plasmas*, **15**, 092702 (2008).
- [Bla08] Blanchot N. *et al.*, *Plasma Physics and Controlled Fusion*, **50**, 124045 (2008).
- [Bou01] Bourgade J.-L. *et al.*, *Rev. Sci. Instrum.*, **72(1)**, p. 1173 (2001).
- [Bou04] Bourgade J.-L. *et al.*, *Rev. Sci. Instrum.*, **75**, p. 4204 (2004).
- [Bou08-1] Bourgade J.-L. *et al.*, *Rev. Sci. Instrum.*, **79**, 10F301 (2008).
- [Bou08-2] Bourgade J.-L. *et al.*, *Rev. Sci. Instrum.*, **79**, 10F304 (2008).
- [Bou08-3] Bourgade J.-L. *et al.*, *Rev. Sci. Instrum.*, **79**, 10E904 (2008).
- [Bou10-1] Bourgade J.-L. *et al.*, *Rev. Sci. Instrum.*, [à paraître / to be published](#).
- [Bou10-2] Bourgade J.-L. *et al.*, [ce fascicule / this issue](#).
- [Bow04] Bowen C. *et al.*, *Phys. Plasmas*, **11(10)**, p. 4641 (2004).
- [Bre05] Breton D. *et al.*, *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, **52**, p. 2853 (2005).
- [Can07] Canaud B. *et al.*, *Plasma Phys. Control. Fusion*, **49**, p. B601 (2007).
- [Cas09] Casner A. *et al.*, *Phys. Plasmas*, **16**, 092701 (2009).
- [Cas10-1] Casner A. *et al.*, [ce fascicule / this issue](#).
- [Cas10-2] Casner A. *et al.*, [en cours de publication / to be published](#).
- [Cel10] Celliers P. *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* (2010). [Accepté / accepted](#).
- [Cho04] *Chocs, Revue scientifique et technique de la direction des applications militaires du CEA*, **30**, nov. 2004. *Scientific and Technical Review of Military Applications division of CEA*, **30**, nov. 2004.
- [Col10] Collier R. *et al.*, [ce fascicule / this issue](#).
- [Cou09] Courtois C. *et al.*, *Phys. Plasmas*, **16**, 013105 (2009).
- [Cou10] Courtois C. *et al.*, [ce fascicule / this issue](#).
- [Dew08] Dewald E. *et al.*, *Phys. Plasmas*, **15**, 072706 (2008).
- [Dis03] Disdier L. *et al.*, *Rev. Sci. Instrum.*, **74**, p. 1832 (2003).
- [Dis04] Disdier L. *et al.*, *Rev. Sci. Instrum.*, **75**, p. 2134 (2004).
- [Dis06] Disdier L. *et al.*, *Phys. Plasmas*, **13**, 056317 (2006).
- [Dis10] Disdier L. *et al.*, [ce fascicule / this issue](#).
- [DOE] DOE reports, <http://www.lle.rochester.edu/publications>
[Volumes / Issues : June 2000, December 2001, May 2005, June 2006](#).
- [Dun06] Dunne M., *Nature Physics*, **2**, p. 2 (2006).
- [Egg08] Eggert J. *et al.*, *Phys. Rev. Lett.*, **100**, 124503 (2008).
- [Gar94] Garçonnet J.-P., *et al.*, *Laser Particule Beam*, **12**, p. 563 (1994).
- [Gft10] Fabrication initiale de la société IN SNEC reprise par Greenfield Technology (2010).
- [Gio96] Giomataris Y. *et al.*, *Nucl. Instr. and Meth. A*, **376**, p. 29 (1996).
- [Gir03] Girard F. *et al.*, *Proceedings of SPIE*, **5196**, p. 220 (2003).
- [Gir05] Girard F. *et al.*, *Phys. Plasmas*, **12**, 092705 (2005).
- [Gir09] Girard F. *et al.*, *Phys. Plasmas*, **16**, 052704 (2009).
- [Gol87] Goldstone P.D. *et al.*, *Phys. Rev. Lett.*, **59(1)**, p. 56 (1987).
- [Haa05] Haan S. W. *et al.*, *Phys. Plasmas*, **12**, 056316 (2005).
- [Hau95] Hauer A. A. *et al.*, *Rev. Sci. Instrum.*, **66(1)**, p. 672 (1995).
- [Hou06] Houry M. *et al.*, *Nucl. Instr. and Meth. A*, **557**, p. 648 (2006).
- [Hus09] Huser G. *et al.*, *Phys. Plasmas*, **16**, 032703 (2009).
- [Jad10] Jadaud J.P. *et al.*, [ce fascicule / this issue](#).
- [Jea07] Jeanloz R. *et al.*, *Proc. Nat. Acad. Sciences*, **104**, p. 9172 (2007).
- [Jon07] Jones O. S. *et al.*, *Phys. Plasmas*, **14**, 056311 (2007).
- [Kir06] Kirkwood R.K. *et al.*, *Phys. Plasmas*, **13**, 082703 (2006).
- [Kor86] Kornblum H. *et al.*, *Rev. Sci. Instrum.*, **57(8)**, p. 2179 (1986).
- [Lan10] Landoas O. *et al.*, [ce fascicule / this issue](#).
- [Ler08] Leray J.L. *et al.*, *IEEE Transaction on Nuclear Science*, **55**, p. 3060 (2008).
- [Lin95] Lindl J. *et al.*, *Phys. Plasmas*, **2(11)**, p. 3933 (1995).
- [LLE03] *LLE annual report (2003)*.
- [LLE07] *LLE annual report (2007)*.
- [LLE08] *LLE annual report (2008)*.
- [LLE09] *LLE annual report (2009)*.
- [Lou04] Loubeyre P. *et al.*, *High Press. Res.*, **24**, p. 25 (2004).
- [Mas07] Masse L., *Phys. Rev. Lett.*, **98**, 245001 (2007).
- [Mon10] Monteil M.C. *et al.*, [ce fascicule / this issue](#).
- [Phi07] Philippe F. *et al.*, <http://meetings.aps.org/link/BAPS.2007.DPP.YO6.2> (2007).
- [Phi10] Philippe F. *et al.*, *Phys. Rev. Lett.*, **104**, 035004 (2010).
- [Pri05] Primout M., *Journal of X-ray Science and Technology*, **13**, p. 13 (2005).
- [Pri08] Primout M. *et al.*, *J. Phys.: Conference Series*, **112**, 042051 (2008).
- [Rai04] Raimbourg J., *Rev. Sci. Instrum.*, **75**, p. 4234 (2004).
- [Res88] Ress D. *et al.*, *Science*, **241**, p. 956 (1988).
- [Rob10] Robey H. *et al.*, *Phys. Plasmas*, [à paraître / to be published](#).
- [San09] Sangster C., *IFSA 2009*.
- [Sch07] Schein J. *et al.*, *Phys. Rev. Lett.*, 175003 (2007).
- [Sku99] Skuspy S. *et al.*, *Phys. Plasmas*, **6(5)**, p. 2157 (1999).
- [Tas01] Tassart J., *Proceedings of 19th IAEA Fusion Energy Conference, IAEA-CN-94/OV/3-3 5IAEA, Lyon, France (2002)*.
- [Tas08] Tassin V. *et al.*, <http://meetings.aps.org/link/BAPS.2008.DPP.GO5.6> (2008).
- [Thf10] Thfoin I. *et al.*, *Rev. Sci. Instrum.*, **81**, 033503 (2010).
- [Tro05] Troussel P. *et al.*, *Rev. Sci. Instrum.*, **76**, 063707 (2005).
- [Van07] Vandenboomgaerde M. *et al.*, *Phys. Rev. Lett.*, **99**, 065004 (2007).
- [Van08] Vandenboomgaerde M. *et al.*, *J. Physics : Conf. Series*, **112**, 022019 (2008).
- [Van10] Vandenboomgaerde M. *et al.*, [ce fascicule / this issue](#).
- [Wax05] Waxer L. J. *et al.*, *Optics and Photonics News*, **16**, p. 30 (2005).
- [Ze92] Ze F. *et al.*, *Rev. Sci. Instrum.*, **63**, p. 5124 (1992).

Album photos / Pictures book



Antoine Compant La Fontaine, Chris Aedy, Didier Brébion, Cédric Courtois, Julien Gazave, Olivier Landoas, Ray Edwards, Jean-Luc Bourgade

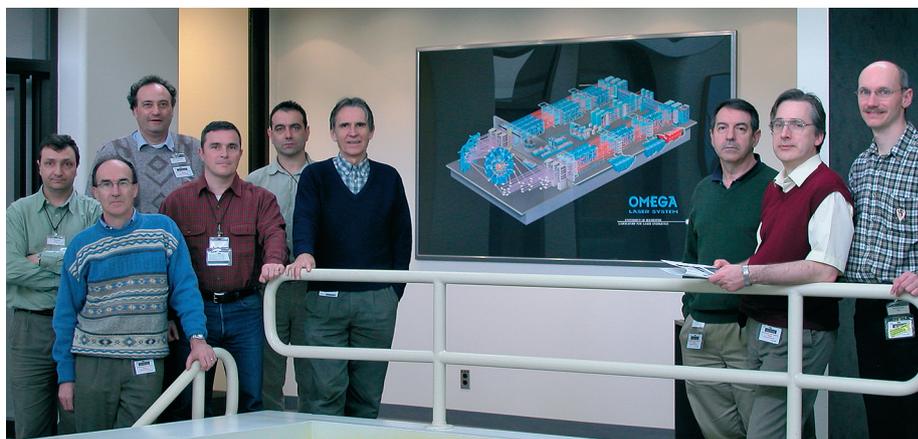
by egypte kowalik, inside LLE's OMEGA EP Control Room

CEA/DAM/DIF & AWE at LLE
Laboratory for Laser Energetics
University of Rochester
Rochester, New York USA
19 May 2009

◀ Le groupe d'expérimentateurs du CEA et d'AWE / CEA and AWE scientists at Omega EP
De gauche à droite / left to right :
Antoine Compant La Fontaine, Chris Aedy, Didier Brébion, Cédric Courtois, Julien Gazave, Olivier Landoas, Ray Edwards, Jean-Luc Bourgade (19 mai / May 2009).

Un groupe d'expérimentateurs CEA au LLE
CEA scientists at LLE
De gauche à droite / left to right :
Gilles Lidove, Philippe Troussel, Jean-Luc Bourgade, Bernard Angelier, Jean-Paul Jadaud, Jacques Beullier, Michel Naudy, André Richard, Joël Raimbourg (avril / April 2002).

Le groupe CEA de l'imagerie neutronique.
The NIS team (voir / see article 9).
De gauche à droite / From left to right :
Alain Rouyer, Alexandre Fedotoff, Laurent Disdier, Serge Chiche, Jean-Luc Bourgade (juin / June 2000).



▲ Un groupe d'expérimentateurs CEA / CEA scientists group at LLE.
De gauche à droite / left to right :
Bruno Villette, Philippe Stemmler, Frank Philippe, Berenice Loupias, Marc Theobald et Jean-Luc Bourgade (22 avril 2009 / 22 april 2009).



◀ Les Pi's dans la salle des Pi's du LLE (septembre 2000).

Pi's in Pi's room at LLE (September 2000).

De gauche à droite / left to right:

Benoit Cnaud (CEA/DIF),
Doug Wilson (LANL),
Scott Evans (LANL),
Fred J. Marshall (LLE).



Omega Target Bay

Omega Control Room



Omega Experimental Operations Group

Laboratory for Laser Energetics
University of Rochester
USA

Tribute to

Philippe Beauvais

&

Patrick LeBorgne

2000-2001

Omega Target Bay

Left to Right

Ron Snyder
Ben Ruth
Greg Pien

Jim Tellinghuisen
PHILIPPE BEAUVAIS
Jeff Rodas
Vern Rekow
Jeff DeWandel
James Eichinger
Brett Gaylord
PATRICK LEBORGNE

Missing

Jack Armstrong
Matt Maslyn
Chuck Sorce

Omega Control Room

Front Row

Jeff Rodas
Greg Pien
Joleen Knox
Stephanie Dent
James Eichinger

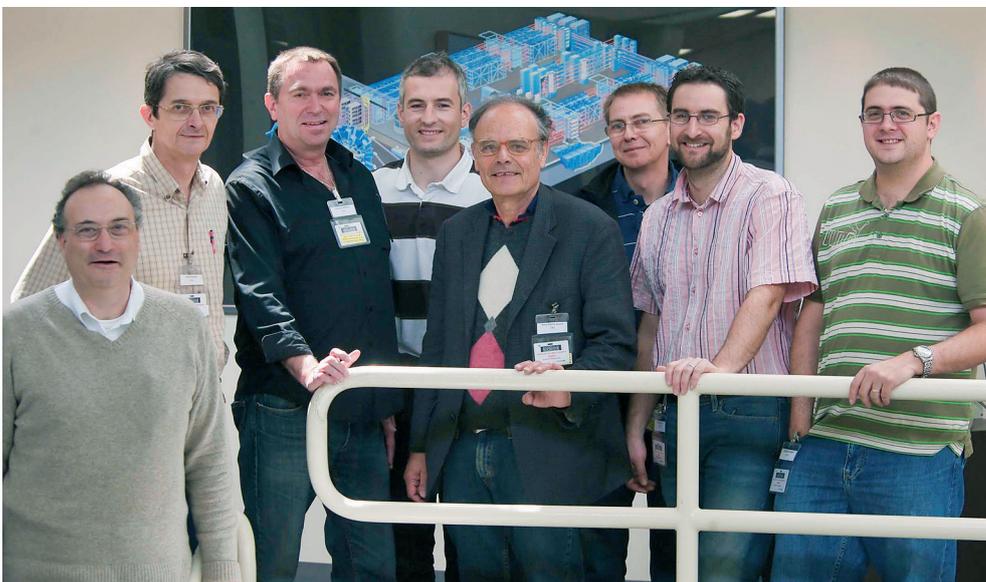
Back Row

Brett Gaylord
Ron Snyder
PATRICK LEBORGNE
Vern Rekow
Jim Tellinghuisen
PHILIPPE BEAUVAIS
Jeff DeWandel
Ben Ruth

Inserts, left to right

Jack Armstrong
Matt Maslyn
Chuck Sorce

Photos: Eugene Kowalek, July 11, 2001



◀ Le groupe d'expérimentateurs du CEA lors d'un « neutron derby ».

CEA scientists during a "neutron derby" at Omega.

De gauche à droite / left to right :

Jean-Luc Bourgade,
Michel Barbotin,
Didier Brébion, Tony Caillaud,
Henri-Patrick Jacquet,
Olivier Landoas, Julien Gazave,
Bertrand Rossé
(14 mai / May 2009).



◀ 1/Roger Janezic, 2/Chi-hwa Wu, 3/Dale Guy, 4/Mark Wittman, 5/Feng-Yu Tsai, 6/Steve Noyes, 7/Noel Alfonso, 8/Jérôme Tidu, 9/David Harding, 10/Luke Elasky, 11/James Saliler, 12/Mark Bonino, 13/Karl Lintz, 14/David Turner, 15/Sal Scarantino, 16/Roger Gram

Target Fabrication Group
 Laboratory for Laser Energetics
 University of Rochester
 USA
 Dedicated to
Jerome Tidu
 1999-2001

Présentation lors de la cérémonie de rétrospective des 10 ans du premier tir purement CEA sur Omega (9 novembre 2009) au LLE (credit photo : Eugene Kowaluk).
 Presentation given for the celebration of the 10 years of the first CEA complete shot on Omega (November 9th, 2009 at LLE) (courtesy of Eugene Kowaluk LLE).



Raymond Bahr,
 L'un des chefs de tir d'Omega/
 One of the Omega's facility shot directors.
 Salle contrôlée de l'installation / control room of the facility.



~ 0°Fahrenheit /
-18°Centigrades en
hiver
sont fréquents à
Rochester.
~ 0°F/-18°C are
common in winter
at Rochester.



◀ Les biches sont
fréquentes
à Rochester.
Deers are
common
at Rochester.



▲ «Barbecue» au LLE (juillet 2000).
"BBQ" party at LLE (July 2000).



◀ Les habits de salle
blanche ainsi que
les lunettes de
protection laser
doivent être revêtus
avant de pénétrer
dans le HE
d'Omega.
Clean room suits
and laser protective
goggles must be
added to enter
the Omega
experimental hall.



▲ Soirée de détente des missionnaires CEA permanents de Rochester.
Relaxing evening for the permanent team at Rochester (mars/March 2000)
De gauche à droite /left to right : Jacques Beullier, Nicolas Dague et Jérôme Tidu.

Acknowledgements

Wolf Seka, Jacques Delettrez, David Meyerhofer at LLE,
and Régine Régnault at CEA are thanked for their help
in correcting the English language of the articles.

Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives 10 ans de collaboration sur le laser Omega

Image de couverture : Image prise de l'intérieur de la chambre d'Omega de 3 m de diamètre, illuminée par la lumière des 60 faisceaux laser focalisés sur une cible. L'image intégrée temporellement montre le plasma généré pendant l'interaction qui ne dure qu'un milliardième de seconde. L'information fugace de ce plasma est analysée par les diagnostics situés à proximité du centre de la chambre d'expérience (crédit photo : Eugene Kowaluk UR/LLE).

Directeurs de la publication : Thierry Massard & Robert L. McCrory.

Comité scientifique : Jean-Luc Bourgade, David Meyerhofer, Steve Loucks, Samuel Morse, John Soures, Denis Juraszek, Jacques Ebrardt, Jean-Luc Miquel.

Rédacteur en chef : Michel Boivineau.

Création : EFIL / www.efil.fr.

Impression : Gibert & Clarey, Chambray-lès-Tours.

Secrétariat, diffusion : Régis Vizet.

Production et édition : CEA -DAM, Bruyères-le-Châtel, F-91297 Arpajon cedex -France

E-mail : chocs@cea.fr

University of Rochester, Laboratory for Laser Energetics 10 years of collaboration on Omega laser facility

Cover picture : The interior of the Omega target chamber illuminated by the light of sixty laser beams focusing on a target at the center of the three-meter-wide chamber. The time-integrated image highlights the plasma generated during the experiment that takes place in less than a billionth of a second. Information during the event is gathered by the diagnostics near the center of the chamber. (Courtesy of Eugene Kowaluk UR/LLE).

Publishers : Thierry Massard & Robert L. McCrory.

Scientific committee : Jean-Luc Bourgade, David Meyerhofer, Steve Loucks, Samuel Morse, John Soures, Denis Juraszek, Jacques Ebrardt, Jean-Luc Miquel.

Editor in Chief : Michel Boivineau.

Designer : EFIL / www.efil.fr.

Printing : Gibert & Clarey, Chambray-lès-Tours.

Secretaryship, distribution : Régis Vizet.

Production and edition : CEA -DAM, Bruyères-le-Châtel, F-91297 Arpajon cedex -France

E-mail : chocs@cea.fr

CHOC **FOCUS** n°1 Juin 2010
Actualités scientifiques à la Direction des applications militaires

Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives
10 ans de collaboration sur le laser Omega

University of Rochester, Laboratory for Laser Energetics
10 years of collaboration on Omega laser facility

