

Premiers diagnostics X pour le LMJ

R. Rosch, C. Reverdin, B. Villette, J.Y. Boutin, J.L. Bourgade, J.P. Jadaud, R. Marmoret, T. Beck, G. Soullié, P. Troussel, C. Trosseille, C. Zuber, H. Maury et A. Richard

CEA, DAM, DIF, 91297 Arpajon, France

Résumé. Nous décrivons les premiers diagnostics X développés actuellement pour le LMJ. Ceux-ci sont principalement dédiés à la qualification de l'installation (mesure de tache focale, contrôle du pointage et de l'équilibrage des faisceaux), mais également au diagnostic de la cavité, du transfert radiatif (mesure de rendement de conversion X), au diagnostic de l'hydrodynamique (expériences de radiographie d'instabilités hydrodynamiques) et à l'imagerie de microballons DT. Ce premier lot de diagnostics comprend deux systèmes de multi imagerie X bidimensionnelle associés à un tube obturateur et un système d'imagerie monodimensionnelle avec une caméra à balayage de fente. Ces trois systèmes d'imagerie X appelés « imageurs X » mesurent le rayonnement dans le domaine [500 eV–15 keV]. Un diagnostic de spectrométrie X large bande fonctionnant dans le domaine [30 eV–20 keV] est également développé. Le *design* des diagnostics prend en compte les problématiques de vulnérabilité aux produits de tirs, de durcissement aux X-durs, gammas et neutrons, de contamination au tritium. Les contraintes liées à l'exploitation sont également considérées puisque l'intervention humaine au sein des diagnostics doit être limitée au cours d'une campagne d'expériences. Les concepts retenus pour ces diagnostics sont présentés, de même que la caractérisation d'une première maquette de microscope de multi imagerie X.

1. INTRODUCTION – CONTEXTE LMJ

Le Laser Mégajoule (LMJ) [1] est une installation du CEA-DAM prévue pour démontrer la possibilité d'obtenir, en laboratoire, un gain thermonucléaire en brûlant un mélange de deutérium et de tritium dans le cadre de la fusion par confinement inertiel. Le LMJ fonctionnera initialement dans un schéma d'attaque indirecte, dans lequel l'énergie laser incidente est focalisée à l'intérieur d'une cavité cylindrique en or (de longueur centimétrique) à travers deux trous d'entrée. La conversion de l'énergie laser en rayonnement X permet d'imploser un microballon de 2 mm de diamètre rempli d'un mélange DT qui se trouve au centre de la cavité. Si l'ignition d'un point chaud parvient à se propager à travers le combustible comprimé, un gain en énergie peut apparaître et produire une bouffée de quelques 10^{18} neutrons pendant un temps très court (~ 30 ps) et sur une étendue spatiale d'environ $100 \mu\text{m}$.

Le CEA-DIF a en charge le développement et la métrologie de tous les diagnostics qui seront mis en œuvre sur l'installation LMJ au cours de sa montée en puissance vers l'ignition. Un panel d'une trentaine de diagnostics est prévu pour mesurer le rayonnement émis du domaine visible au domaine neutronique, en passant par le domaine X.

Les diagnostics de rayonnement X sont essentiels sur une installation laser à forte puissance comme le LMJ. En effet, l'interaction laser-matière conduit à la formation d'un plasma qui peut émettre jusqu'à 60% du rayonnement laser incident dans le domaine X ($0.1 \leq h\nu \leq 10$ keV). Il est donc essentiel de mesurer ce rayonnement X, reflet des paramètres fondamentaux du plasma (température, densité, degré d'ionisation).

Les premiers diagnostics X développés pour le LMJ doivent fournir les mesures de base tout au long de la vie de l'installation. Ils doivent donc demeurer opérationnels sous des forts débits de dose de radiations nucléaires. Or, pour des besoins de résolution et de luminosité, ils sont placés relativement proches de la source. Cette problématique de vulnérabilité impose un *design* avec des composants pouvant fonctionner dans un environnement bien plus sévère que ceux rencontrés dans les installations laser actuelles (LIL, OMEGA). Cet environnement est dû aux flux intenses de neutrons, de gammas, d'ions énergétiques, de rayonnements électromagnétiques et dans certains cas, de débris et d'éclats. En complément de matériaux adaptés, les premiers diagnostics du LMJ intègrent un ensemble de filtres de protection amovibles, permettant d'effectuer une campagne expérimentale d'environ 15 à 20 tirs successifs sans intervention sur le diagnostic. Nous décrivons ici le *design* des 4 premiers diagnostics X du LMJ: des diagnostics d'imagerie X et un spectromètre X large bande.

2. LES DIAGNOSTICS D'IMAGERIE X

Les imageurs X doivent servir au diagnostic des conditions initiales (qualification de l'installation au sens de la mesure des taches focales et de leur structure, contrôle du pointage et de l'équilibrage des faisceaux) mais également au diagnostic de l'hydrodynamique (mise en évidence d'instabilités au cours d'expériences de radiographie) et à l'imagerie du microballon.

Les trois imageurs X réalisés fonctionnent dans le domaine [0.5–15 keV] et ont les sigles suivants:

- IXDCM2t: Multi Imagerie X-Durs bidimensionnelle à Champ Moyen et à résolution Temporelle.
- IXDGC2t: Multi Imagerie X-Durs bidimensionnelle à Grand Champ et à résolution Temporelle.
- IXDGC1t: Imagerie X-Durs monodimensionnelle à Grand Champ et à résolution Temporelle.

Les performances qu'ils doivent satisfaire pour garantir les mesures sont précisées ci-dessous (tableau 1) :

Tableau 1. Performances des premiers diagnostics d'imagerie pour le LMJ.

Type d'imageur	Détecteur	Champ d'observation	Résolution spatiale	Résolution temporelle
Multi Imageur grand champ "IXDGC2t"	Tube obturateur	15 mm	150 μm	75 ps
Multi imageur champ moyen "IXDCM2t"	Tube obturateur	3 mm	30 μm	75 ps
Imageur grand champ "IXDGC1t"	Caméra à balayage de fente	15 mm 5 mm	150 μm 50 μm	30 ps (base de temps 5 ns)

2.1. Architecture des diagnostics d'imagerie X

Les imageurs X sont mis en œuvre à leur distance de fonctionnement grâce à des Systèmes d'Insertion de Diagnostic (SID) répartis tout autour de la chambre d'expériences. L'architecture d'un imageur X (ensemble accostable sur un SID) est présentée sur la figure 1. L'imageur comprend un microscope X (unité contenant les optiques d'imagerie ainsi que les éléments de protection à la vulnérabilité) et un détecteur placé à l'avant d'une « boîte à air » (ensemble étanche contenant toute l'électronique de détection à la pression atmosphérique). Le microscope est lié à l'analyseur optique (ensemble boîte à air + détecteur) grâce à une structure mécanique télescopique. L'allonge télescopique permet d'augmenter la distance entre le microscope et le détecteur et ainsi d'être plus éloigné de la cible pour un grandissement donné, sachant qu'il existe une zone d'exclusion (sphère de rayon 50 cm) autour du centre chambre.

Le détecteur mis en œuvre sur les multi imageurs 2D est un tube obturateur à galette de micro canaux pulsée. Il est développé au sein du service électronique du CEA-DIF. La géométrie de ce détecteur

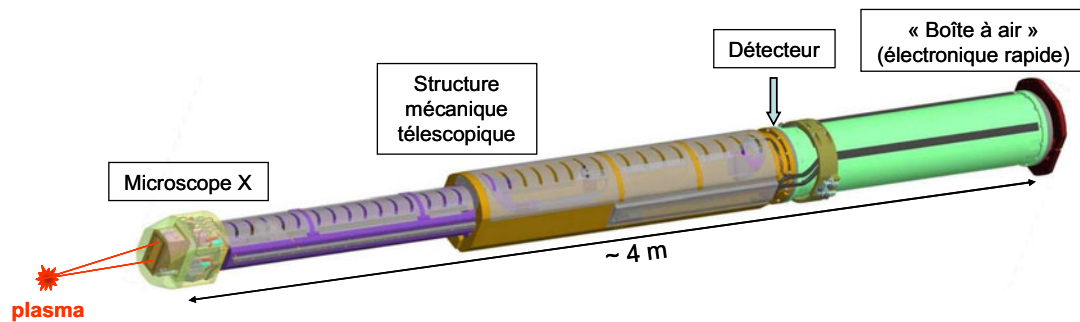


Figure 1. Architecture d'un diagnostic d'imagerie X montrant le microscope X, la structure mécanique télescopique et le détecteur à l'extrémité de la « boîte à air ».

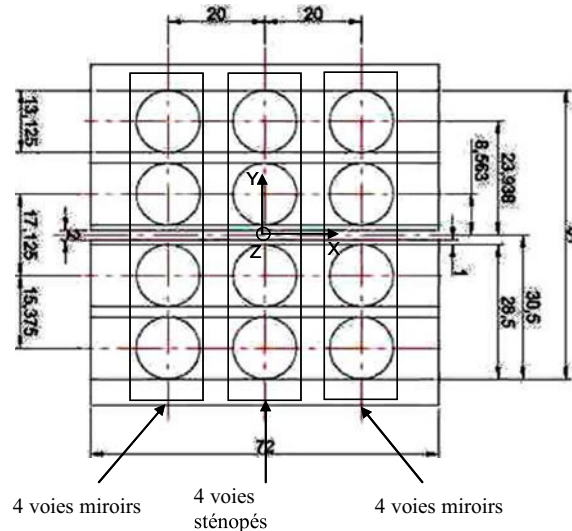


Figure 2. Surface sensible du tube obturateur à 4 pistes conductrices ARGOS.

appelé ARGOS (Analyseur Rapide à Grande Ouverture Spatiale) est donnée sur la figure 2. Il comporte quatre pistes conductrices de grande dimension ($13.125 \text{ mm} \times 72 \text{ mm}$) dont l'essentiel de la surface est utilisable. Sa résolution spatiale intrinsèque est d'environ $90 \mu\text{m}$ et conditionne en partie le *design* du diagnostic au sens de la géométrie et du grandissement, même si le microscope intervient également dans la résolution spatiale globale du diagnostic. Ainsi, un grandissement de 4 sur l'imageur IXDCM2t (distance entre le microscope et la cible: 60 cm) est requis pour obtenir une résolution spatiale globale de $30 \mu\text{m}$ (dans l'hypothèse où la résolution de l'imageur est la somme quadratique des contributions du détecteur et du microscope, prises égales à 50% chacune). Sur l'imageur IXDGC2t, un grandissement voisin de 1 est suffisant pour obtenir une résolution spatiale de $150 \mu\text{m}$ (distance entre le microscope et la cible: 2.5 m). L'imageur IXDGC1t dispose quant à lui de deux grandissements d'utilisation (1 et 3) pour garantir les deux spécifications demandées: $150 \mu\text{m}$ sur un champ de 15 mm et $50 \mu\text{m}$ sur un champ de 5 mm. Les distances correspondantes entre le microscope et la cible sont alors respectivement de 2.5 m et de 80 cm.

Concernant le microscope, le CEA-DIF détient depuis de nombreuses années une expertise en imagerie par miroirs X. Les miroirs X en incidence rasante présentent de nombreux avantages: bonne résolution spatiale, domaine spectral assez étendu grâce aux revêtements multicouches, bonne

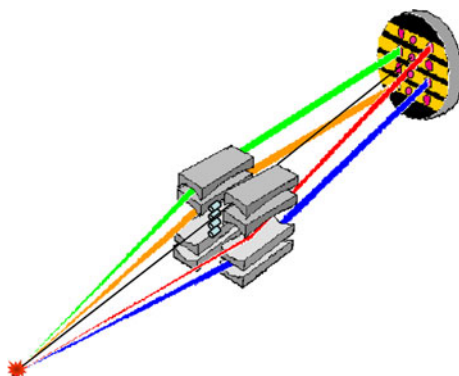


Figure 3. *Design* optique d'un microscope multi imageur associé au tube obturateur ARGOS.

luminosité. Ils sont utilisables à des distances de la source assez importantes. Le principe de réflexion permet par ailleurs de protéger le détecteur contre les produits de tir directs issus de la cible.

Des microscopes multi imageurs 2D de type Kirkpatrick-Baez à miroirs sphériques croisés ont été développés pour la Ligne d'Intégration Laser (LIL) [2]. Des prototypes de mono imageurs X haute résolution à base de miroirs toriques ont également été conçus [3].

A partir de la géométrie d'ARGOS, le *design* de nos multi imageurs X pour le LMJ combine ces deux savoir faire et prévoit l'utilisation de huit miroirs toriques assemblés selon un montage optique innovant (figure 3).

L'angle d'incidence sur les miroirs résulte d'un compromis: il doit être inférieur au degré pour réfléchir le rayonnement X-durs, tout en restant le plus élevé possible pour limiter les aberrations et la longueur du miroir, c'est-à-dire l'encombrement du microscope. Un angle de 0.7° est un compromis intéressant pour étendre le domaine spectral jusqu'à 10 keV, grâce à un revêtement multicouche adapté [4] sans être toutefois trop rasant, ce qui imposerait des miroirs trop encombrants.

Le nombre de miroirs X intégrables dans le microscope est limité à huit, compte tenu de leur encombrement, soit deux images sur chacune des pistes d'ARGOS. D'autres systèmes d'imagerie extrêmement compacts comme les sténopés et lentilles réfractives X peuvent s'intégrer aisément dans le microscope et former une 3^{ème} image au centre de chacune des pistes du tube obturateur.

Les sténopés sont des systèmes simples, robustes, sans aberrations et utilisables à partir de 1–2 keV (en deçà, la résolution spatiale est dégradée par la diffraction). Ils sont toutefois peu lumineux (résolution correspondant au diamètre du sténopé) et fonctionnent par projection directe, c'est-à-dire que les produits de tir néfastes à la mesure (tels que les X-durs) sont en vue directe du détecteur et de ses composants internes. Ils sont donc à éviter sur des tirs à taux d'X-durs potentiellement élevés.

Les lentilles réfractives sont des systèmes compacts, peu coûteux, lumineux avec une très bonne résolution ($\sim 10 \mu\text{m}$) sur un champ centimétrique. Elles fonctionnent au-delà de 5–6 keV, car en deçà, l'absorption du rayonnement est trop importante. Elles présentent l'inconvénient d'être chromatiques.

Concrètement, les microscopes multi imageurs IXDCM2t et IXDGC2t vont former huit images par miroirs X et quatre images supplémentaires par sténopés (pour IXDCM2t), ou par lentilles réfractives (IXDGC2t). La distance entre le microscope IXDCM2t et la source (60 cm) rend en effet l'utilisation de sténopés possible (d'un point de vue luminosité et résolution) alors que sur le microscope IXDGC2t, l'utilisation de lentilles réfractives est plus judicieuse. L'ensemble permet donc de former 12 instantanés d'une même zone de plasma source avec un temps de pose d'environ 75 ps. Les trois microscopes forment également une image intégrée en temps sur une caméra de type CID mise en œuvre dans le plan de détection.

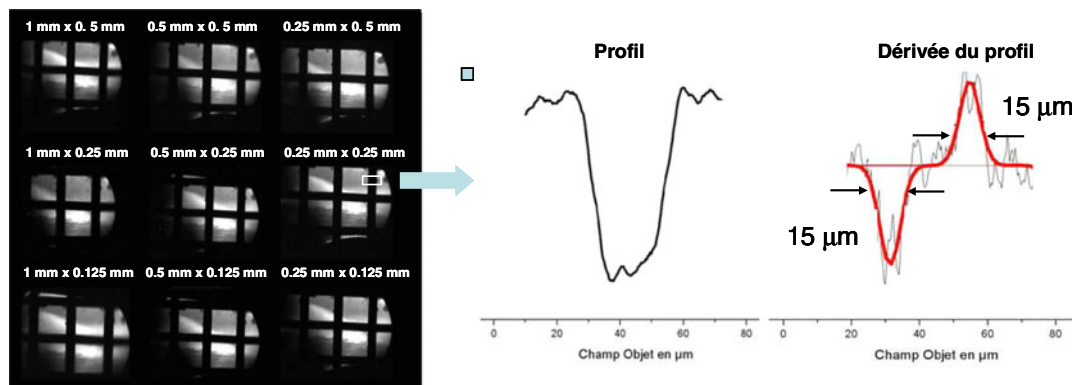


Figure 4. Métrologie de la maquette de multi imageur X par analyse d’images de radiographie.

Le microscope IXDGC1t utilise en plus de miroirs X, un sténopé pour le grandissement 3 et une lentille réfractive pour le grandissement 1.

Le montage optique de multi imagerie X 2D présenté ci-dessus nécessite toutefois des maquettes de faisabilité. Une première maquette a été réalisée par la société l’Optique Commerciale. Elle fait l’objet du paragraphe suivant.

2.2. Réalisation d’une maquette de microscope multi imageur X

La maquette de microscope de multi imagerie a pour objectifs de valider la faisabilité de réalisation de miroirs toriques aux rayons de courbure demandés ($R \sim 100$ m, $r \sim 20$ mm) et de valider les concepts opto – mécaniques, en particulier l’empilement vertical de miroirs. Cette maquette a été qualifiée sur un de nos bancs de métrologie X qui comprend une source X de 3 mm d’étendue, émettant un rayonnement X dans le domaine [500 eV–8 keV], une chambre d’expériences et un détecteur de type CCD refroidi. A partir d’images de mire (grilles en Nickel) de pas et de trait donné ($40 \mu\text{m}/340 \mu\text{m}$), nous avons mesuré les performances du microscope pour différentes conditions de collimation (largeur et hauteur de fentes de 1 mm à $125 \mu\text{m}$) en utilisant la méthode présentée sur la figure 4, qui évalue la résolution spatiale à partir de la dérivée du profil local au voisinage d’un trait de la mire.

Les résultats de la maquette ont validé tous les objectifs du cahier des charges et ont montré le bon accord avec les prévisions réalisées grâce au logiciel d’optique ZEMAX.

Comme cité plus haut, le design des imageurs X doit prendre en compte l’environnement agressif du LMJ, ce qui est l’objet du paragraphe suivant.

2.3. Vulnérabilité des premiers imageurs X LMJ

Les premiers diagnostics X, placés relativement proches de la source pour des besoins de résolution et de luminosité doivent pouvoir continuer à être opérationnels sous de forts débits de dose de radiations nucléaires, typiquement quelques 10^{14} n/4 π g [5]. Nous avons pris en considération dès la phase de conception (figure 5) les problématiques suivantes:

- La vulnérabilité aux produits de tir (éclats, débris). Il s’agit de protéger principalement les optiques contre les débris générés par le laser et la vaporisation de la cible elle-même et des matériaux environnants. Notre système anti-débris est constitué de trois films minces de type mylar faiblement aluminisés, séparés physiquement, disposés en rouleaux, tendus et inclinés par rapport à l’axe optique du diagnostic d’environ 10° de sorte que les débris produits par le filtre lui-même sont éjectés perpendiculairement au filtre donc dans une direction inoffensive pour le reste du diagnostic.

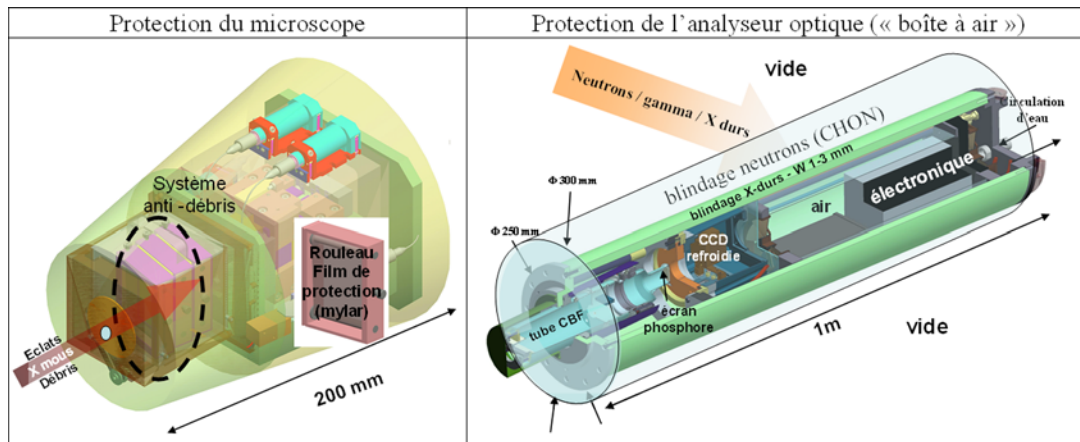


Figure 5. Design des imageurs X dans l'environnement agressif du LMJ.

– Les rayonnements X durs, gamma et neutron produits à l'intérieur de la cavité. Les miroirs X coupent naturellement le rayonnement au-delà de 10 keV. Les voies à sténopés ou à lentilles réfractives X ne seront pas utilisées lors de tirs à fort taux d'X-durs potentiel. L'analyseur optique est équipé d'un blindage en matériau lourd, typiquement quelques millimètres de tungstène pour limiter l'endommagement des composants électroniques par le rayonnement X-dur. Il est équipé d'un blindage en matériau léger (CHON) pour limiter l'endommagement des composants électroniques lié aux neutrons.

– Le rayonnement électromagnétique est pris en compte principalement par le blindage des câbles.

– La contamination au tritium est également à prendre en compte, car même dans un tir à gain, seulement 30% du tritium est brûlé par les réactions thermonucléaires. Le reste se répand autour de la chambre et dans les systèmes qui y sont reliés (systèmes d'insertion, groupes de pompage,...). Le tritium peut contaminer les différentes parties des diagnostics se trouvant dans la chambre d'expériences. Le microscope est revêtu d'une coiffe qui limite la contamination interne. La boîte à air est une enceinte totalement étanche et prévue pour être « douchable » dans un protocole de décontamination.

En plus des conditions agressives de l'environnement LMJ, il est demandé aux diagnostics de pouvoir assurer une campagne de 15 à 20 tirs sans intervention humaine. Les films de protection et les différents filtres liés à la mesure sont donc mis en œuvre dans des barillets automatisés et pilotés depuis le contrôle commande des diagnostics.

3. LE SPECTROMÈTRE X LARGE BANDE

Le spectromètre X large bande permettra de mesurer la puissance radiative émise par le plasma source en fonction des différents paramètres d'irradiation. Il est basé sur une technique de mesure non dispersive utilisant des écrans absorbants. Il comprend 20 voies de mesure réparties entre 30 eV et 20 keV. Chaque voie (figure 6) se compose de deux collimateurs, d'un filtre mince (intégré dans un barillet de filtres) et d'une diode à vide reliée à un analyseur électrique rapide. Les voies d'énergie inférieure à 1.2 keV sont équipées en outre de miroirs sous incidence rasante afin d'éliminer la transmission des filtres dans les énergies élevées et ainsi en améliorer la pureté spectrale.

Sur le spectromètre X, les débris et éclats induisent des dommages encore plus sévères que sur les imageurs X. Ce diagnostic est prévu pour fonctionner jusqu'à un environnement neutronique de 10^{16} n/4 π . Selon le type d'expérience, le diagnostic apporte une mesure précise avec résolution temporelle

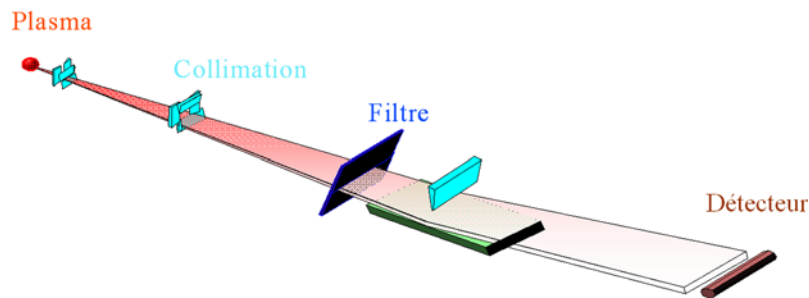


Figure 6. Schéma de principe d'une voie de mesure élémentaire.

d'un rendement de conversion X ou d'une température de cavité, à partir d'une mesure de puissance spectrale intégrée dans une bande passante.

La précision de mesure de ce diagnostic nécessite une métrologie fine et périodique des filtres, miroirs et détecteurs sur les lignes de métrologie des synchrotrons Bessy, Brookhaven et prochainement sur SOLEIL. C'est une contrainte lourde à gérer vis-à-vis de la vulnérabilité. En effet, la formation de trous par impact de débris au niveau des filtres de mesure (quelques microns d'épaisseur) peut par exemple dégrader la qualité de la réponse temporelle des voies de mesure à basse énergie (≤ 1 keV). Ce diagnostic dispose donc d'un système de contrôle de chaque filtre *in situ* permettant d'éclairer chaque filtre et de visualiser la présence de trous sur une caméra CCD.

En plus du spectromètre, ce diagnostic emporte des mesures complémentaires (diagnostics dits « compagnons ») :

- Une imagerie du trou d'entrée des faisceaux lasers (TEL), dont l'objectif est de mesurer le bouchage du TEL au cours de l'irradiation et ainsi de corriger le calcul de température de ce diamètre non constant.
- Une mesure de spectrométrie fine dans le domaine [1–5 keV] réalisée grâce à un réseau en transmission (5000 traits/mm) associé à une caméra à balayage de fente X.
- Une mesure de puissance X à partir de détecteurs diamants utilisée sur des tirs à haut flux (tirs à gain) comme diagnostic d'échec (consommable).

Références

- [1] N. Fleurot et al., Fusion Eng. Des. **75** 147 (2005)
D. Besnard et al. J. Phys. Conf. Ser. **112** 012004 (2008)
- [2] R. Rosch et al., Rev. Sci Instrum. **78**, 033704 (2007)
- [3] Ph. Troussel et al. Rev. Sci Instrum. **76**, 063707 (2005)
- [4] Ph. Troussel et al. , article même colloque UVX
- [5] J. L. Bourgade et al., Rev. Sci Instrum. **79**, 10F301 (2008)