

Imagerie X monochromatique à haute résolution dans un domaine large bande pour le Laser MégaJoule

D. Denetiere¹, Ph. Troussel¹, R. Rosch¹, C. Reverdin¹, L. Hartmann¹,
A. Richard¹, F. Bridou², F. Delmotte² et P. Audebert³

¹ CEA, DAM, DIF, 91297 Arpajon, France

² LCFIO, CNRS, Université Paris Sud, Campus Polytechnique, 91127 Palaiseau Cedex, France

³ LULI, CNRS, École Polytechnique, 91127 Palaiseau Cedex, France

Résumé. Cet article traite du dimensionnement des diagnostics imageurs X à haute résolution spatiale ($\leq 10 \mu\text{m}$) conçus et développés pour le Laser MégaJoule. On introduira ceux-ci en abordant les objectifs physiques des expériences mettant en jeu ces imageurs ainsi que l'environnement hostile dans lequel ils seront susceptibles de travailler. On étudiera les concepts géométriques liés au caractère haute résolution des imageurs. Enfin, on s'attachera à l'aspect particulier de la conception de diagnostics imageant des rayons X avec une bande passante allant jusqu'à 20 keV.

1. INTRODUCTION

Le Laser MégaJoule (LMJ) a pour objectif de réaliser l'implosion et la fusion par confinement inertiel d'un microballon rempli d'un mélange de deutérium et de tritium. Ce microballon aura initialement une taille millimétrique et sera comprimé avec un rapport d'aspect important. Des instabilités hydrodynamiques peuvent perturber l'implosion du microballon, ce qui nécessite de les analyser à l'aide d'imageurs X haute résolution.

Ces instabilités hydrodynamiques et la surface sur laquelle celles-ci se développent, vont déterminer les caractéristiques de notre diagnostic. La résolution spatiale sera, par exemple, fonction des dimensions caractéristiques de l'une d'elles : l'instabilité de Rayleigh Taylor. Afin de pouvoir observer celle-ci, il sera nécessaire de pouvoir résoudre des défauts surfaciques de l'ordre de $5 \mu\text{m}$. Le champ de notre diagnostic sera, quant à lui, imposé par la taille du microballon : 0,5 à 1 mm. L'acquisition de l'image aura lieu pendant l'implosion du microballon qui s'accompagne d'un environnement particulièrement rude dans lequel seront émis de multiples rayonnements ainsi que des débris. Il sera donc nécessaire de prendre un certain nombre de mesures préventives pour éviter la destruction du diagnostic pendant le tir. L'une de ces mesures est la distance minimale d'approche à respecter entre la cible, et la pupille d'entrée du diagnostic : 50 cm. Cette distance va imposer la frontale objet minimale de notre imageur. Le dernier aspect à considérer est le *design* d'un imageur pour le LMJ : l'imagerie X visualise le rayonnement X propre du microballon ou le rayonnement issu d'une source de radiographie d'énergie multi-keV située derrière celui-ci dans l'axe microscope-microballon. Le spectre des rayons X à imager couvre une bande d'énergie correspondant aux raies d'absorption de ces sources. Pour réfléchir ces énergies, seuls des miroirs sur lesquels sont déposés des traitements multicouches sont envisageables. On abordera ces traitements en dernière partie.

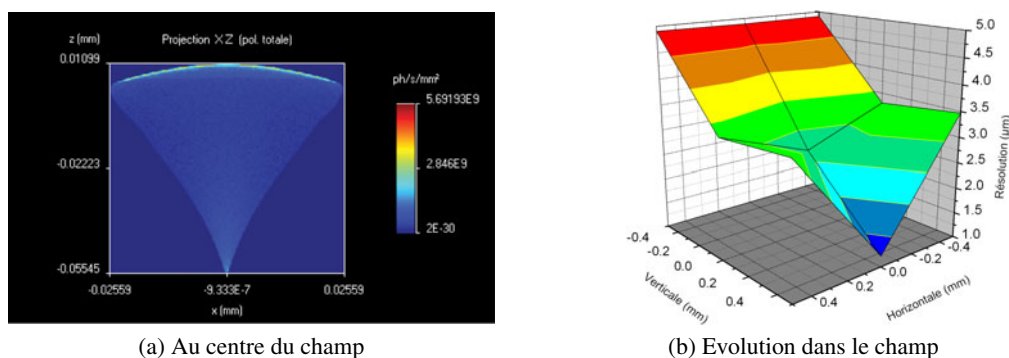


Figure 1. Simulations sur SpotX [5] de la réponse impulsionnelle du microscope BIMITOX.

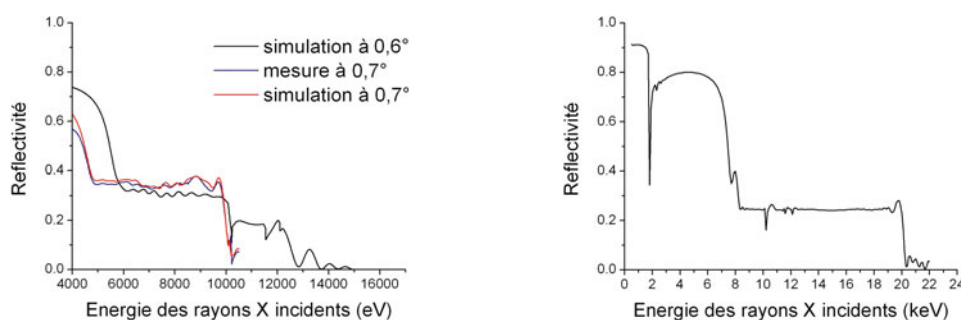
2. PRINCIPES DE *DESIGN* GÉOMÉTRIQUE POUR LES IMAGEURS X HAUTE RÉOLUTION

L'énergie des rayons X que l'on cherche à imager nous impose de travailler à faible angle de rasance.¹ Les principes de l'optique par réflexion indiquent que les formes de miroirs les mieux appropriées pour l'imagerie à incidence rasante sont des coniques [1]. Pour imager une source à une distance finie la conique adaptée est alors l'ellipse, dont la propriété est d'avoir une conjugaison point-point parfaite entre ses deux foyers. Mais l'ellipse a un champ nul,² et il est très difficile technologiquement de polir une surface elliptiquement avec les bons profils. Pour augmenter le champ, une solution consiste à associer deux miroirs en série de telle manière que la condition des sinus d'Abbe est vérifiée. Pour le second aspect, celui de la forme de la surface, nous avons opté pour des surfaces toriques approchant l'ellipse. Cela a donné lieu à la réalisation d'un premier microscope le BIMITOX³ (BI-Miroirs TORiques X) [2] qui a permis d'obtenir une résolution inférieure à $5 \mu\text{m}$ dans une dimension dans un champ de $1 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$ pour des grandissements allant de 8 à 40, comme le montre la figure 1. Des expériences sur des installations laser telles que PHEBUS [3] (CEA-DAM) ou OMEGA (LLE Université de Rochester) ont montré l'intérêt de ce microscope [4]. Cependant, celui-ci, en tant que prototype, a été conçu pour travailler avec des lasers de puissance de caractéristiques (kJ, ns) et à des frontales de l'ordre de la vingtaine de centimètres. Dans le cas du Laser MégaJoule, nous devons travailler à des frontales de 50 cm voire plus pour éviter les impacts de débris de cible avec la surface des miroirs. C'est dans ce contexte qu'a été conçu le microscope PIXEL [6] (Plasma Imageur pour les Expériences Laser), qui travaille à 80 cm avec une résolution théorique inférieure à $5 \mu\text{m}$ dans un champ de $3 \text{ mm} \times 3 \text{ mm}$ pour des grandissements allant de 4 à 15. Mais un tel changement de frontale a un coût : afin de garder une haute résolution dans tout le champ, il a fallu ajouter un troisième miroir au microscope. Nous avons mesuré des résolutions de $6 \mu\text{m}$ dans la dimension sagittale et $10 \mu\text{m}$ dans la dimension tangentielle [6] dans un champ de l'ordre de $1 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$. La grande sensibilité de la résolution vis-à-vis de l'alignement des miroirs entre eux a fait que nous sommes revenus à des frontales de 50 cm pour nos futurs développements. Une solution à deux miroirs a été privilégiée dans le cas du LMJ. Le développement s'est orienté sur l'aspect spectral de la conception comme nous le verrons au paragraphe 3.

¹ Angle entre rayon incident et surface de l'optique.

² C'est-à-dire que la résolution d'un imageur elliptique se dégraderait très rapidement dès lors que l'on s'éloignerait de son foyer.

³ BIMITOX est le nom du microscope, son diagnostic associé est HRXI (High Resolution X-Ray Imager).



(a) Comparaisons du traitement des miroirs de EHRXI à 0,6° et 0,7°

(b) Simulation du traitement haute énergie en développement à 0,45°

Figure 2. Réponse spectrale de traitements multicouches aperiodiques.

3. PRINCIPE DE *DESIGN* ET D'OPTIMISATION DE L'ASPECT SPECTRAL

Comme nous l'avons expliqué au paragraphe 1, l'imagerie de la cible est réalisée à partir d'une source multi-keV, composée d'éléments allant du béryllium au tantale. La bande d'énergie qui nous intéresse se situe donc entre 2 et environ 20 keV. Celle-ci permet d'exploiter les raies L d'absorption de l'or qui se situent autour de 13 keV. Travailler à cette dernière énergie peut se révéler particulièrement intéressant puisque l'on cherche à radiographier le microballon de la cible LMJ à travers sa cavité en or. Le prototype BIMITOX a été conçu avec des miroirs sur lesquels un dépôt de nickel avait été déposé, ce qui, à un angle de rasance de 0,6°, permet de réfléchir des rayons X d'énergie inférieure à 5 keV. Nous avons décidé d'améliorer HRXI en EHRXI (pour Extended HRXI) en changeant les miroirs.

Pour adapter l'imageur HRXI à une plus grande gamme spectrale correspondant aux différentes sources de radiographie, nous avons opté pour le développement de traitements de miroirs multicouches large bande ou supermiroirs. Ces traitements sont obtenus par dépôts successifs de périodes d'épaisseurs diverses constituées de 2 à 3 matériaux d'indices différents. Ces couches produisant des réflexions partielles successives, elles permettent par interférence d'obtenir une réflexion partielle sur une large bande d'énergie [7,8]. La figure 2(a) montre la réflectivité d'un miroir dont le traitement a été optimisé grâce au logiciel TFCalc [9]. Ce traitement est composé de 32 couches de tungstène et de carbure de silicium et a été prévu pour une utilisation à 0,7° [10]. Cet angle de rasance est issu d'un compromis : sa borne supérieure est imposée par l'énergie maximale des rayons X que l'on cherche à réfléchir et sa borne minimale par la perte de flux induite par l'étalement du faisceau de rayons X incident. Afin d'avoir une plus grande excursion en énergie, nous avons optimisé ce traitement pour travailler à 0,6°. Il va, par ailleurs, être déposé à la fois sur les miroirs des premiers diagnostics LMJ [11] et sur les miroirs de EHRXI. La figure 2(a) présente le traitement original à 0,7° simulé et caractérisé sur le synchrotron Bessy II ainsi que son optimisation à 0,6°.

La réponse spectrale large bande du traitement de EHRXI ci-dessus permet de travailler avec des sources de radiographie différentes jusqu'à 10 voire 12 keV. Cependant, si l'on veut utiliser des sources de plus hautes énergies ou exploiter les raies L d'absorption de l'or, il est nécessaire d'améliorer la réponse spectrale des traitements des miroirs. La figure 2 montre un exemple de réponse spectrale simulée d'un tel traitement travaillant à un angle de rasance de 0,45° : la plage en énergie est élargie jusqu'à 20 keV. On constate que sur le domaine 6-9 keV, on perd le caractère constant de la réflectivité du miroir.

4. CONCLUSION

Nous avons abordé les différentes contraintes liées à la conception de diagnostics X destinés au Laser MégaJoule. Nous avons aussi démontré notre capacité à réaliser des diagnostics à haute résolution dans un domaine large bande que l'on sait définir. Actuellement, la sélection d'une énergie dans cette bande se fait grâce à un choix de filtres adaptés. Nous proposons de réaliser un diagnostic d'imagerie X à haute énergie accordable associant deux miroirs toriques ayant une bande passante large à un miroir plan multicouche ayant une bande passante étroite ($E/\Delta E \sim 10$). Celui-ci permettra de sélectionner une énergie de travail dans une bande passante jusqu'à 20 keV. L'interchangeabilité ou la rotation du monochromateur aboutira à un imageur haute résolution monochromatique accordable dans un domaine large bande pour le Laser MégaJoule.

Références

- [1] H. Wolter, *Annalen der Physik*, **10**, (1952), 94–114.
- [2] P. Troussel et al., *Review of Scientific Instruments*, **76**, (2005).
- [3] Ph. Baclet et al., *Proceeding of IFSA*, (1999).
- [4] P. Troussel et al., *Proceedings of the Society of Photo-optical Instrumentation engineers (SPIE)*, **3773**, (1999), 60–69.
- [5] T. Moreno, *SpotX : logiciel de simulation de lignes de rayons X par tracé de rayons*, Caminotech.
- [6] H. Maury et al., *Proceedings of the Society of Photo-optical Instrumentation Engineers (SPIE)*, **7430**, (2009), 74300Q1–8.
- [7] H. Maury et al., *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research section-A*, **621**, (2010), 242–246.
- [8] C. Morawe et al., *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research section-A*, **493**, (2002), 189–198.
- [9] *Software Spectra, TFCalc : Logiciel de design optique*.
- [10] Ph. Troussel et al., *Article du même colloque UVX*.
- [11] R. Rosch et al., *Article du même colloque UVX*.