

## DIAGNOSTICS D'IMAGERIE X POUR LES EXPÉRIENCES SUR LA LIL

R. ROSCH, J.-Y. BOUTIN, J.-P. LE BRETON, D. GONTIER,  
J.-P. JADAUD, C. REVERDIN, G. SOULLIÉ, G. LIDOVE, R. MARONI  
CEA - DAM - Île-de-France

**A**fin de caractériser finement l'évolution spatiale et temporelle des plasmas créés par laser sur la LIL, quatre diagnostics d'imagerie X originaux ont été développés [1]. Ils sont constitués d'un microscope à miroirs qui forme une ou plusieurs images du plasma sur la face d'entrée d'une caméra ultra-rapide. Ces microscopes sont conçus selon le principe de Kirkpatrick-Baez qui associe des couples de miroirs sphériques croisés. Les diagnostics d'imagerie présentés ici ont fournis de nombreux résultats sur diverses expériences réalisées avec la Ligne d'Intégration Laser (LIL). Un exemple sur la formation d'un jet de plasma est présenté.



L'imagerie X est une composante essentielle dans le diagnostic des plasmas créés par laser. Les techniques courantes d'imagerie par sténopés montrent leurs limites, dans des expériences sur des lasers de puissance, pour deux raisons : limitation par la diffraction (*qui empêche l'observation de structures fines du plasma*), faible luminosité qui oblige à placer l'imageur à quelques centimètres de la cible (*ce qui la rend vulnérable aux effets des produits du tir*). À l'inverse, l'imagerie par optiques réfléchives KB (Kirkpatrick-Baez) [2] offre de nombreux avantages : résolution spatiale de quelques microns, pouvoir réflecteur élevé (50 %), grande frontale (*plusieurs dizaines de cm*).

Deux diagnostics de multi-imagerie [3], dont les microscopes sont constitués de six miroirs, forment huit images de la cible sur un tube obturateur pulsé (*galette de micro-canaux avec une résolution de 80 ps*). Le premier diagnostic image une zone de plasma de 3 mm x 3 mm, avec une résolution spatiale de 30  $\mu\text{m}$ . Il fonctionne dans le domaine spectral sub-keV. Le second diagnostic est sensible dans le domaine spectral de 1 à 5 keV, et image un champ de 1 mm x 1 mm, avec une résolution spatiale de 10  $\mu\text{m}$ . Deux diagnostics X supplémentaires, constitués d'un couple de miroirs, réalisent une imagerie 1D sur une caméra à balayage de fente. Les grandes frontales de tous ces microscopes permettent de les positionner à une distance de la cible située entre 40 et 70 cm, ce qui limite considérablement leur détérioration par les débris de la cible.

### La conception et la métrologie des microscopes

La conception des microscopes multi-KB a été réalisée au CEA grâce au logiciel de tracés de rayons TRACE. Chaque microscope comprend six miroirs cylindriques arrangés sur trois étages. Une image est produite par deux réflexions sur des miroirs perpendiculaires. Chaque miroir contribue à la formation de deux à quatre des huit images finales, grâce à l'utilisation de différentes zones de leur surface (*figure 1*). Les miroirs du microscope X-durs, utilisés à 0,8 degrés, ont un rayon de courbure de 47 m, et sont revêtus de platine, avec une ouverture angulaire totale de 0,5 mrad. La distance entre la source et le microscope est de 40 cm, et le grandissement est de 8. Le microscope X-mous fonctionne en dessous du keV, avec les caractéristiques suivantes : revêtement en silicium, courbure de 20 m, angle d'attaque de 1,8 degré, frontale de 40 cm, grandissement de 4, ouverture angulaire de 1 mrad. La rugosité des surfaces polies est inférieure à 5 Å rms (root mean square).

Les blocs optiques sont équipés d'un système d'alignement intégré, comprenant trois crayons optiques (*diode laser associée à une fibre*). Deux crayons, vers l'avant, convergent au foyer objet du microscope, et un crayon matérialise l'axe optique arrière de ce dernier. La précision d'alignement sur la cible est meilleure que 100  $\mu\text{m}$ .

La fabrication et l'intégration opto-mécanique des microscopes ont été sous-traitées aux sociétés EUROPTICS et IRELEC.

La métrologie a été réalisée au CEA - DAM, sur le banc spécifique RIBER. Des images d'une mire de résolution, placée devant une source X étendue, ont été enregistrées sur une caméra CCD refroidie. La résolution spatiale des optiques a ainsi été mesurée en tout point du champ objet, ainsi que la fonction de transfert de modulation

du système. La réponse spectrale a été obtenue grâce à un spectromètre de type *Si(Li)* [4]. Les mesures sont en bon accord avec la simulation, et ont permis de vérifier les performances des miroirs (*revêtement, rugosité*).

Ces microscopes sont mis en œuvre dans les systèmes d'insertion standard de la LIL, qui assurent un positionnement du diagnostic à 50  $\mu\text{m}$  près, et permettent une reconfiguration rapide des diagnostics entre deux campagnes d'expériences.

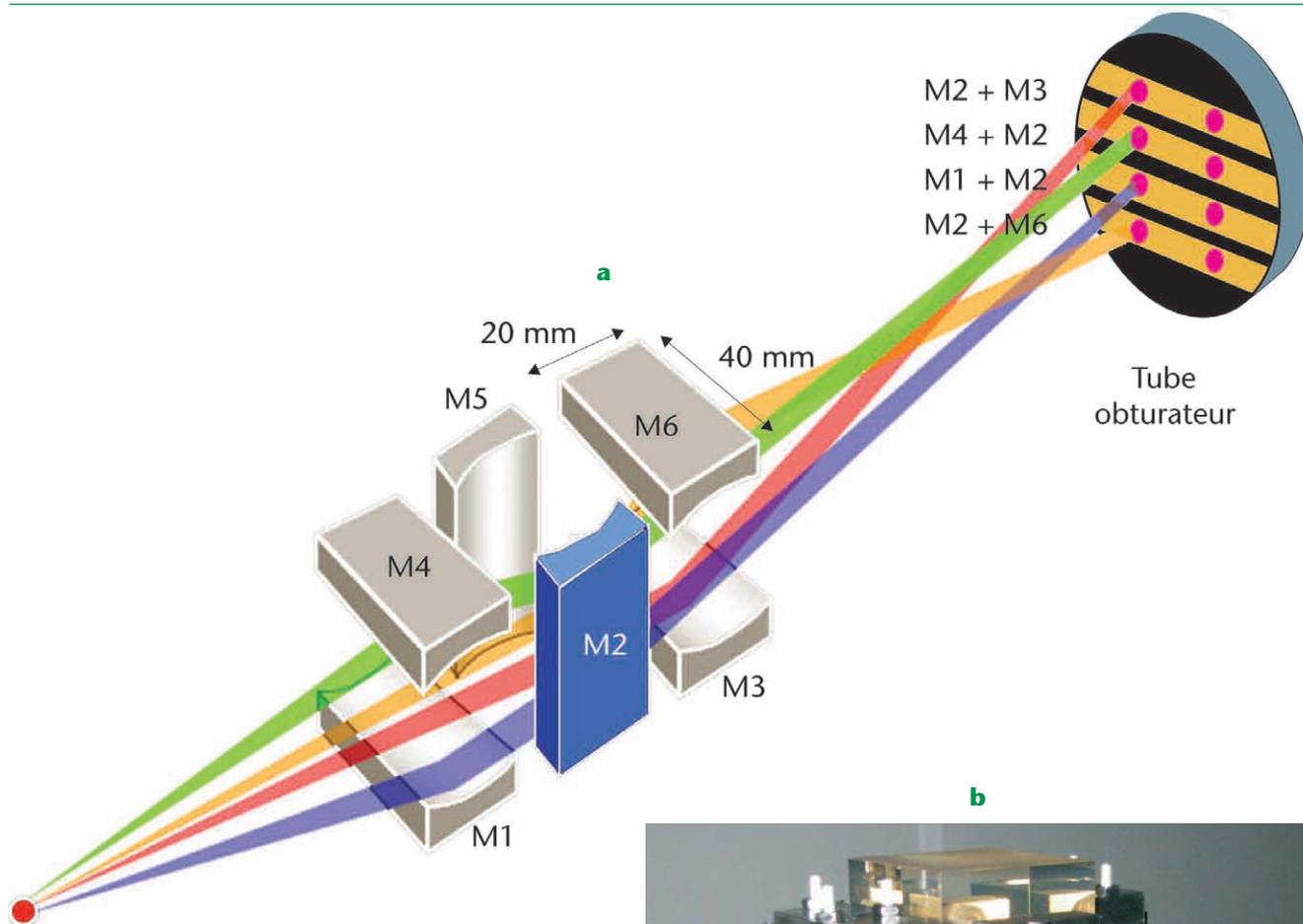


Figure 1

**a** Schéma du montage optique original des microscopes multi-KB produisant 8 images du plasma sur un tube obturateur. Nous avons illustré la formation de quatre images à partir des deux réflexions faisant intervenir le miroir M2. Les quatre autres images se forment de manière symétrique à l'aide du miroir M5.

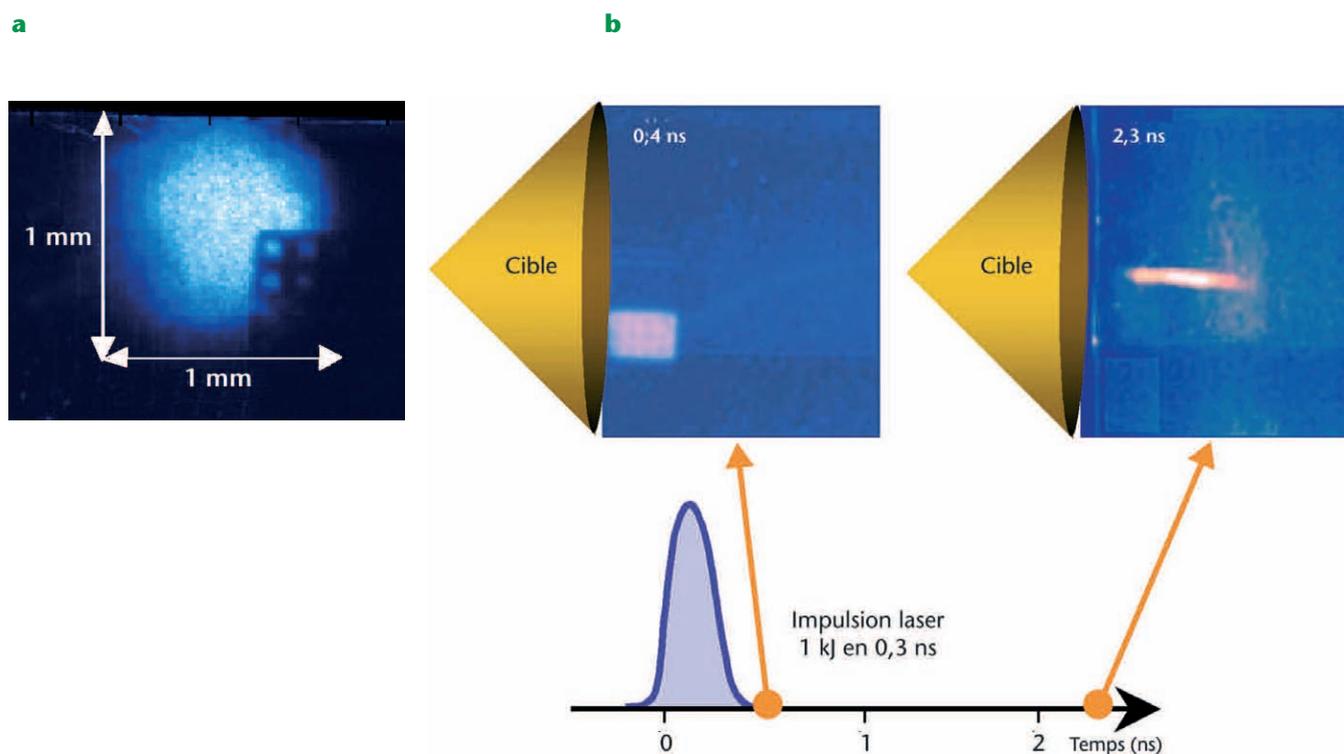
**b** Image du bloc optique correspondant.

### Exemple d'utilisation sur la LIL

Plusieurs expériences menées sur la LIL ont utilisé les deux microscopes multi-KB [4]. L'une d'elles est une expérience de jet de plasma dans laquelle les quatre faisceaux UV ( $3\omega$ ) en impulsion courte ( $300\text{ ps}$ ) éclairent l'intérieur d'un cône en or. Le plasma créé par cette irradiation ( $1,2\text{ kJ}$ ,  $5.10^{14}\text{ W.cm}^{-2}$ ) se détend vers le centre du cône et collisionne sur l'axe où il se densifie. Il se propage ensuite, plusieurs nanosecondes après l'arrêt du laser, sous forme d'un jet, le long de l'axe, en émettant un rayonnement de quelques centaines d'eV. Le microscope X-mous – pour le rayonnement au-dessous de  $500\text{ eV}$  – a permis de mesurer l'instant d'émission du jet après l'impact des faisceaux lasers sur le cône, la longueur du jet, son diamètre, et sa vitesse supersonique de propagation (de l'ordre de  $500\text{ km.s}^{-1}$ ) (figure 2). Le microscope X-durs était filtré avec  $5\text{ }\mu\text{m}$  d'aluminium. Il a montré que l'impact des faisceaux sur le cône était bien uniforme. Les résultats présentent un bon accord avec les simulations.

### Références

- [1] R. ROSCH et Al., "X-ray imaging with grazing-incidence microscopes developed for the LIL program", *Rev. Sci. Instrum.*, **78**, p. 033704 (2007).
- [2] P. KIRKPATRICK, A. V. BAEZ, "Formation of Optical Images by X-Rays", *J. Opt. Soc. Am.*, **38**, p. 766-774 (1948).
- [3] F. J. MARSHALL, J. A. OERTEL, P. J. WALSH, "Framed, 16-image, Kirkpatrick-Baez microscope for laser-plasma x-ray emission", *Rev. Sci. Instrum.*, **75**, p. 4045-4047 (2004).
- [4] P. DHEZ, H. DUVAL, J.-C. MALAURENT, "Multilayer X-ray mirror calibration by an energy dispersive method using an X-ray tube and a Si(Li) detector: Absolute reflectivity, energy band pass and overlapping order determination", *J. X-Ray Sci. Technol.*, **3**, p. 176-193 (1992).



**Figure 2**  
**a** Image dans le domaine X-durs (au-delà de  $1\text{ keV}$ ) de l'impact des faisceaux dans le cône, avec l'ombre de la grille servant de référence spatiale.

**b** Images perpendiculaires dans le domaine X-mous ( $300\text{ eV}$ ), à deux instants différents, montrant la grille chauffée par le plasma, puis le jet émissif en avant du cône.