

Améliorations des dispositifs à haute résolution spatio-temporelle
utilisés pour les études de plasma créés par laser

Improvements of high spatio-temporal resolution instruments used for laser-fusion studies

J. Launspach, D. Billon, C. Cavaller, J. David, J.P. Lebreton,
M. Rostaing, R. Sauneuf, R. Verrecchia

Commissariat à l'Energie Atomique, Centre d'Etudes de Limeil-Valenton,
B.P. n° 27, 94190 Villeneuve-Saint-Georges, France

Abstract

Streak cameras are now currently used as a basic tool in the diagnostics instrumentation or laser-plasma interaction studies.

We have recently shown at the 15th congress which was held in San Diego the properties of the the P 650 soft X-ray camera¹ having both optimized spatial and temporal resolutions (16-20 lp.mm⁻¹, 3 to 5 ps). During 1983-1984 we have continued our efforts to improve and extend the performances of these diagnostics. New developments include :

- the used of a cylindrical mirror with the P 650 X-ray streak camera, in order to obtain a streaked soft X-ray imaging device which will be describe with some more details in the following paper.
- study of a new X-ray streak camera using a modified image converter tube P 750 X with a best lamellar optics.
- enhancement of photocathode sensitivity by testing new materials.
- development of new photocathode-tube window arrangement in order to record both laser and X-ray signals.
- another important improvement in the same field is the C.C.D. readout which is presented in other papers.

Introduction

L'irradiation d'une cible par un laser de grande puissance conduit à la formation d'un plasma caractérisé par des dimensions petites (100 μm à quelques mm) et une durée de vie brève (100 picosecondes à quelques nanosecondes). Dans les expériences où l'on étudie les divers processus physiques de l'interaction laser-matière ou les mécanismes d'implosion de cible², interviennent de nombreux paramètres dont certains sont difficilement maîtrisables et par conséquent reproductibles. Il est donc nécessaire d'effectuer, en un seul tir, un grand nombre de mesures simultanées et, si possible, de suivre l'évolution des phénomènes en fonction du temps et de l'espace. Cette dernière exigence requiert la mise en oeuvre de dispositifs de mesure ayant des résolutions spatiale et temporelle élevées (quelques microns et quelques picosecondes).

La caméra électronique à balayage de fente constitue un outil privilégié pour suivre l'évolution temporelle de phénomènes lumineux très rapides, dans une large gamme spectrale s'étendant du domaine infra-rouge et visible jusqu'au domaine X.

Au CEL-V, nous utilisons désormais de façon courante des caméras THOMSON TSN 506³ équipées de tubes P500 fabriqués par RTC⁴. Cependant, un certain nombre d'améliorations sont apparues nécessaires. La première a consisté à transformer des tubes scellés équipés de photocathodes sensibles au rayonnement X dans la gamme 1 à 10 keV, pour étendre leur sensibilité jusqu'au domaine X-mous (100 eV à 10 keV)⁵. Pour cela on utilise des photocathodes en or ou en CsI déposées sur une fenêtre mince en plastique ($\approx 1 \mu\text{m}$). Ces photocathodes n'étant pas capables de supporter la pression, le tube travaille directement dans le vide de la chambre d'expérience. La seconde a donné lieu au développement d'une nouvelle génération de tubes, à optique bilamellaire^{1 et 6} qui améliore simultanément les résolutions spatiale et temporelle.

Dans le domaine des photocathodes, hormis la recherche de composées chimiques plus sensibles dans le domaine X (CsI par exemple) apparaît un besoin de matériaux déposés sensibles dans deux domaines de longueur d'onde ce qui permet, par exemple, d'effectuer une chronométrie précise de l'émission X du plasma par rapport à l'impulsion laser⁷⁻⁹. Une première solution consiste à utiliser une photocathode CsI, sensible à la fois au rayonnement X émis par la cible et au rayonnement ultra-violet correspondant aux fréquences harmoniques supérieures ou égales à 3 du rayonnement laser ($\lambda_0 = 1,06 \mu\text{m}$). Une autre solution consiste à utiliser une photocathode Sl^{10-11} , sensible à la fois à l'infra-rouge et au rayonnement X, celle-ci étant déposée sur une fenêtre mince pas trop absorbante mais les problèmes technologiques du scellement de la fenêtre ne sont pas encore complètement résolus.

La meilleure utilisation possible des caméras à balayage de fente pour résoudre les problèmes de chronométrie consisterait à enregistrer sur le même cliché trois voies de mesure :

- l'impulsion laser qui crée le plasma
- les signaux X que l'on veut recaler par rapport à l'impulsion laser
- un marqueur temporel constitué d'un train d'impulsions dont la fréquence de récurrence est connue afin de connaître la vitesse de balayage en chaque point de l'écran. On peut dans ce cas utiliser une ou plusieurs fibres optiques pour acheminer le signal de marquage sur la photocathode de la caméra¹².

Enfin, un effort important est consacré à la lecture électronique d'image. Ce sujet étant traité en détails dans d'autres communications de ce congrès¹³⁻¹⁷ nous décrivons plus particulièrement ici un nouveau dispositif à résolution spatio-temporelle sensible dans le domaine X-mous.

Le diagnostic "Fentastix-mous"

Pour suivre l'évolution spatio-temporelle de l'émission X d'une cible, on associe généralement un dispositif de résolution spatiale à une caméra à balayage de fente qui assure la résolution temporelle. Dans le domaine spectral 1 - 10 keV l'image du plasma peut être formée sur la fente de la caméra au moyen d'un simple sténopé (diamètre minimum = 5 μm) ; pour simplifier les problèmes d'alignement on peut aussi remplacer le sténopé par une fente de résolution spatiale, orthogonale à la fente de résolution temporelle de la caméra (c'est le diagnostic "Fentastix" présenté sur la figure 1). En chaque point de cette dernière fente on reçoit donc l'émission X provenant d'un plan de la cible passant par la fente de résolution spatiale alors qu'avec un sténopé on intègre l'émission X suivant une direction du plasma passant par le sténopé. Dans le domaine X-mous ($h\nu < 2 \text{ keV}$), on ne peut plus utiliser de simples optiques X telles qu'un sténopé ou une fente à cause des problèmes de diffraction. Une possibilité est offerte par les optiques à miroirs travaillant en incidence rasante ; dans ce cas, le système équivalent à la fente de résolution spatiale est un simple miroir cylindrique ; c'est ce que nous avons utilisé dans le diagnostic "Fentastix-mous" qui permet d'enregistrer l'évolution spatio-temporelle de l'émission d'une cible dans le domaine 100 eV - 10 keV.

La figure 2 montre le schéma du dispositif. Le miroir cylindrique permet de résoudre l'émission du plasma suivant une direction orthogonale aux génératrices ; il forme ainsi une image monodimensionnelle du plasma avec un grandissement de 20 sur la photocathode de la caméra. Autrement dit, en chaque point de la fente de la caméra, on reçoit l'émission X provenant d'un plan du plasma parallèle aux génératrices du miroir. Ce miroir joue donc le même rôle qu'une fente de résolution spatiale orthogonale à la fente de résolution temporelle de la caméra.

La distance du plasma au centre du miroir est de 328 mm. La distance miroir-image est donc de 6560 mm. C'est à cet endroit que l'on place l'ensemble fente-photocathode de la caméra, celle-ci étant reliée à la chambre d'expérience par un long tube sous vide. Devant la caméra on trouve un dispositif de visée reflex ; il comprend une membrane semi-transparente escamotable qui, lorsqu'elle est mise en place permet d'observer la fente de la caméra à des fins d'alignement. Devant cette visée reflex, se trouve un dispositif porte film placé entre deux vanes d'isolement. Les informations recueillies sur un film placé à ce niveau sont très utiles lors de la phase de réglage du diagnostic (test de présence du signal, pré-alignement, etc.). Notons que le film peut avoir une forme annulaire pour laisser passer en son centre l'information vers la caméra.

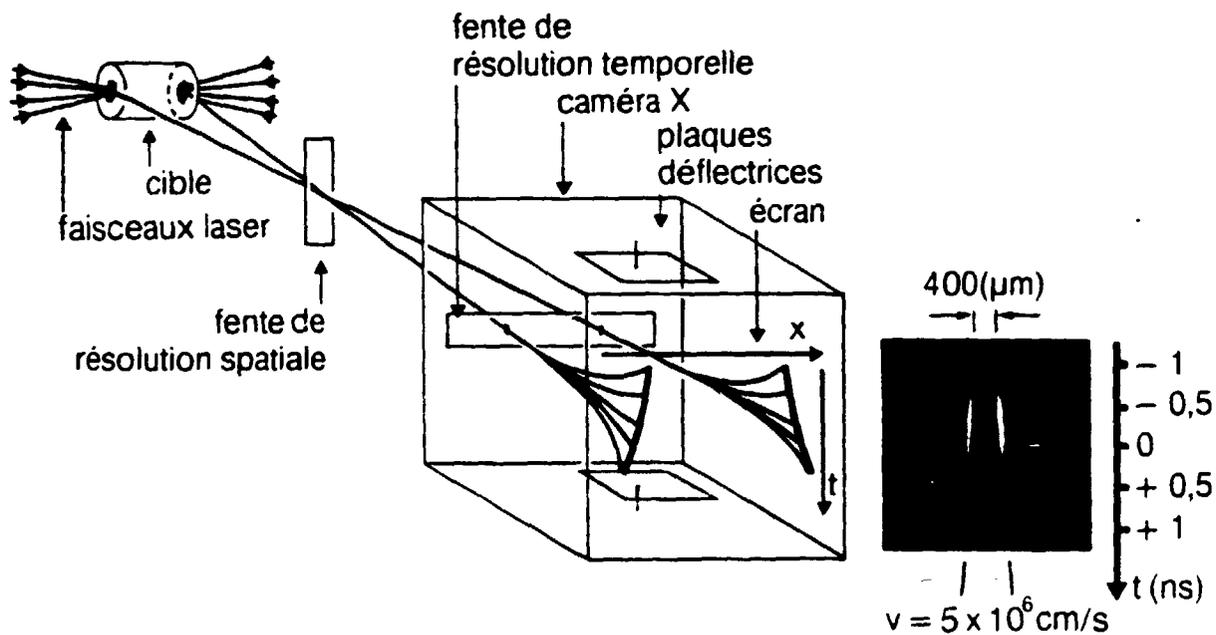


Figure 1. Diagnostic "Fentastix" : dispositif d'imagerie avec résolutions spatio-temporelle dans le domaine 1 - 10 keV

DISPOSITIF D'IMAGERIE AVEC RESOLUTIONS SPATIO-TEMPORELLE DANS LE DOMAINE X-MOUS

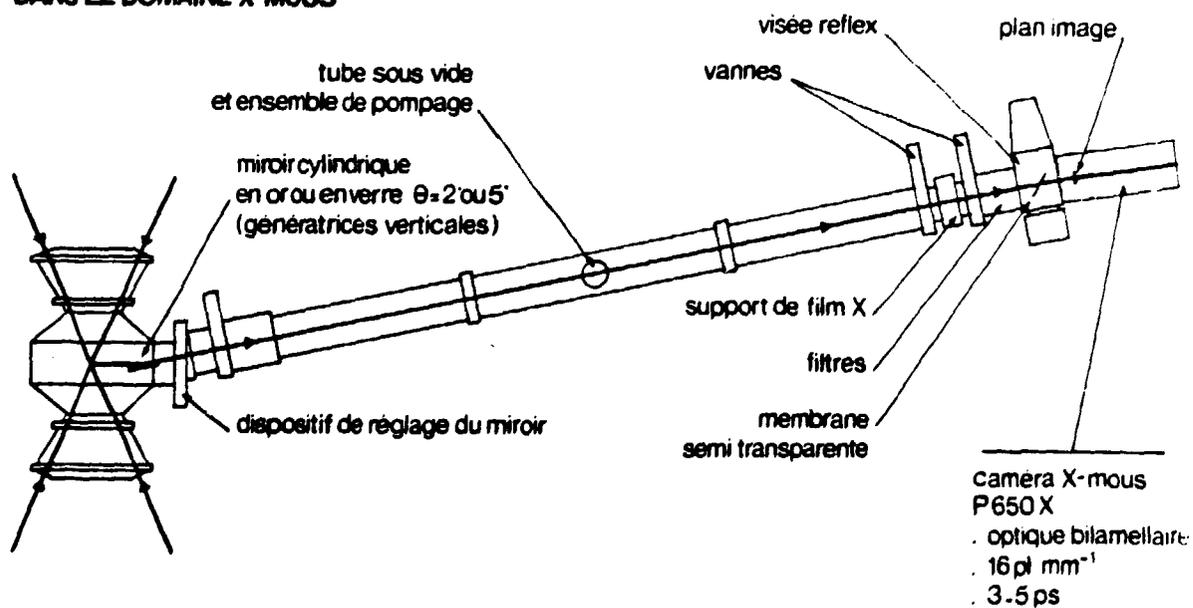


Figure 2.

CARACTERISTIQUES DES MIROIRS

ANGLE D'ATTAQUE		$\theta = 2^\circ$	$\theta = 5^\circ$
- RAYON DE COURBURE	R	17,130 μ m	7,160 μ m
- LONGUEUR DU MIROIR	L	10 μ m	15 μ m
- MEILLEURE RESOLUTION	λ	5 μ m	5 μ m
- PROFONDEUR CHAMP	Δ	215 μ m	1 μ m
- LARGEUR CHAMP	Δy	190 μ m	240 μ m
- ANGLE D'OUVERTURE	α	0,03 mrad	0,25 mrad
NATURE SURFACE MIROIR		SILICE OR	SILICE OR
- ENERGIE BASSE (DIFFRACTION)	E_1	100 eV - 100 eV	100 eV - 100 eV
- ENERGIE COUPURE	E_2	262 eV - 2,4 keV	350 eV - 1 keV

CARACTERISTIQUES GENERALES

- DISTANCE OBJET-MIROIR $D = 308 \text{ mm}$
- GRANDISSEMENT $\times 10$
- DISTANCE MIROIR-IMAGE $D' = 3080 \text{ mm}$
- RESOLUTION $S = 2 \text{ } \mu\text{m}$

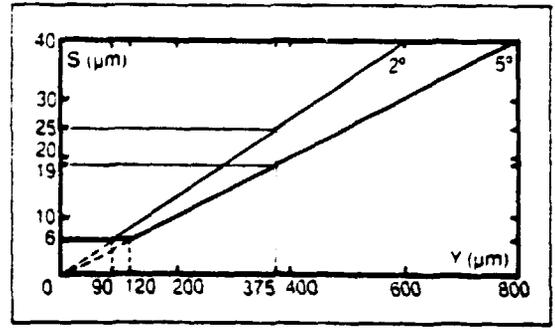


Figure 3.

Outre sa fonction de résolution spatiale, le miroir joue également le rôle d'un filtre passe-bas en fréquence, la fréquence de coupure étant fonction de la nature du matériau et de l'angle d'attaque¹⁸. Les caractéristiques de miroirs en or et en silice travaillant à 2° ou 5° sont présentées sur la figure 3. Nous avons essentiellement utilisé le miroir en or à 2° car sa réflectivité s'étend au-delà de 2 keV (figure 4), ce qui permet de collecter un plus grand nombre de photons, lors de la mise en route du diagnostic.

La figure 5 montre la méthode utilisée pour aligner le miroir. Les réglage consistent en une rotation autour de la génératrice centrale (axe vertical) et une translation horizontale perpendiculaire à l'axe de la chambre d'interaction. En outre on peut déplacer l'ensemble tube à vide - caméra de façon à amener la photocathode sur l'image du plasma. Les pré-réglages sont effectués à l'aide d'un laser continu He-Ne dont le faisceau lumineux passe par un trou de 400 μ m situé au centre de la chambre d'expérience, à la place de la cible. Le miroir, dont la face active diffère peut d'un plan (rayon du cylindre \gg longueur du miroir), a une section horizontale en forme de trapèze isocèle dont les angles à la base valent $90^\circ - \theta$, cette valeur représentant l'angle d'incidence des rayons X par rapport à la normale au miroir ; l'autocollimation sur la face d'entrée permet donc de régler le miroir en rotation, et la translation permet de centrer le faisceau incident sur la face active du miroir. Pour cela, on enregistre la variation de l'intensité lumineuse diffusée sur un photomètre situé à la place de la caméra en fonction de la position y du miroir. La courbe obtenue étant symétrique, le position y_0 du maximum est donnée par $y_0 = \frac{y_1 + y_2}{2}$ où y_1 et y_2 sont les deux positions pour lesquelles l'intensité est égale à la moitié de la valeur maximale.

REFLECTIVITE DE MIROIRS X

d'après B.L.MENKE et al. Atomic Data and Nuclear Data Tables
V27 Vol27, No1, Jan 1982

----- $\theta = 2^\circ$
..... $\theta = 5^\circ$

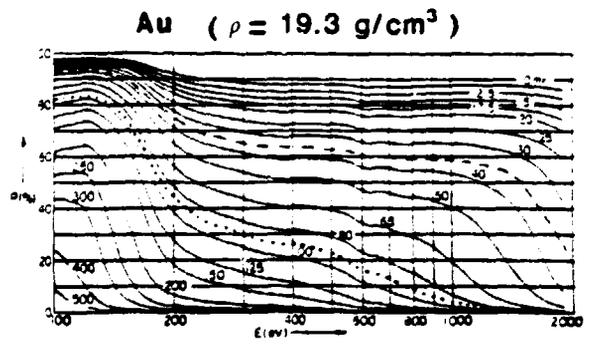
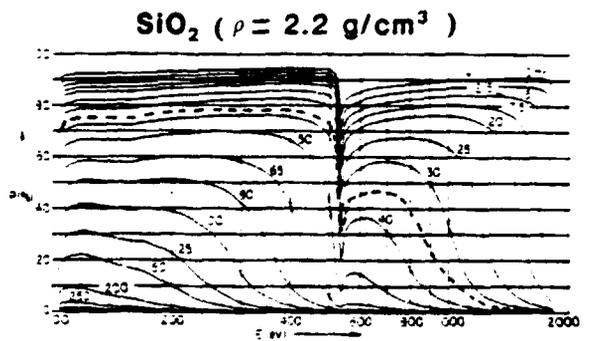


Figure 4.

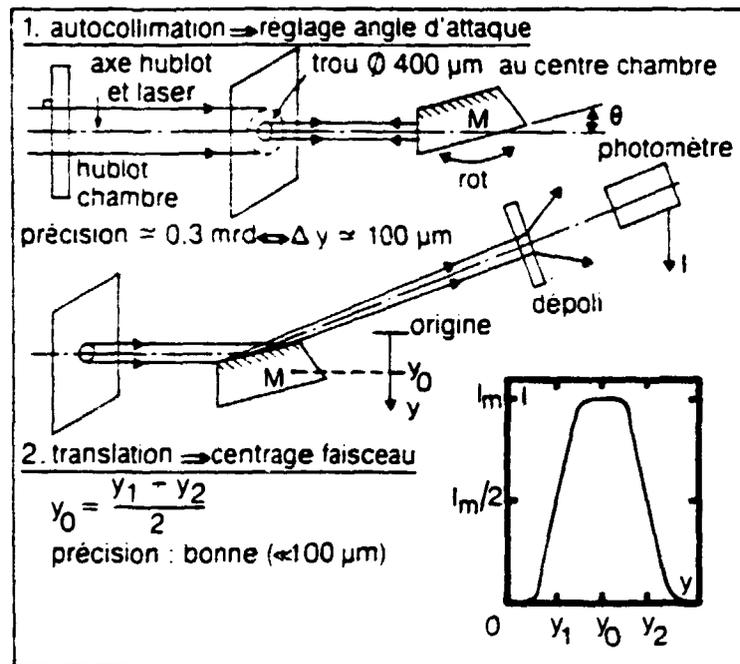


Figure 5. "Fentastix-mous" : procédure d'alignement du miroir cylindrique éclairé en lumière visible

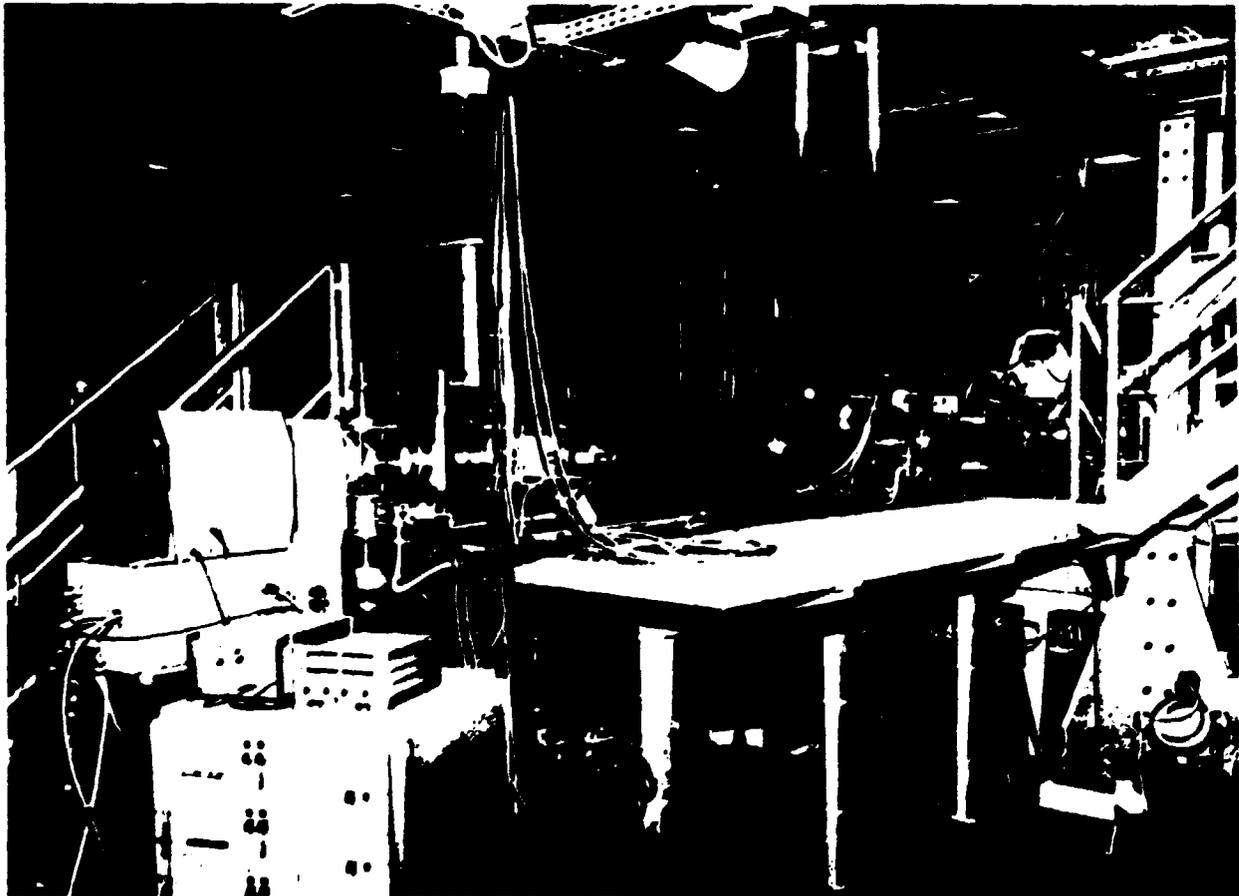


Figure 6. Photographie du dispositif "Fentastix-mous" implanté sur l'expérience Hélio-trope

Le faisceau lumineux réfléchi permet ensuite de positionner la caméra. La précision de ces réglages permet d'espérer une résolution, au niveau de l'objet, meilleure que 40 μm sur la totalité du champ (12 mm) (figure 3).

Pour obtenir une bonne résolution spatio-temporelle nous avons couplé à ce dispositif un prototype de caméra bilamellaire P650X (3 à 5 ps - 16pt/mm à 20pt/mm sur la photocathode) dont les performances ont été présentées à SAN DIEGO¹. L'ensemble du diagnostic (miroir + caméra) a ainsi une résolution spatiale limitée par le miroir de 6 μm pour une résolution temporelle de 3 à 5 ps.

La figure 6 montre une photographie du dispositif implanté sur l'expérience Héliotrope¹⁹. Dans cette expérience, les huit faisceaux du laser Octal (1 KJ - 1 ns - 1,06 μm) sont rassemblés en deux fagots de 4 dont le demi-angle est 22,30°, chaque faisceau étant ouvert à $f/6$ avec $f = 720$ mm.

La figure 7 montre le principe de test du miroir cylindrique dans le domaine X-mous. On irradie une cible constituée d'une feuille en cuivre ou en or de 50 à 200 nm d'épaisseur. Les deux plasmas ainsi créés éclairent une mire collée sur la tranche de la feuille. Cette mire est constituée de barres verticales (parallèles aux génératrices du miroir cylindrique) dont le pas est compris entre 20 et 40 μm . On enregistre l'image de cette mire donnée par le miroir sur un film. Dans l'exemple de la figure 7 on peut voir qu'une mire de 40 μm est parfaitement résolue sur un champ objet de plus de 1 mm.

PRINCIPE DE TEST D'UN MIROIR CYLINDRIQUE
DANS LE DOMAINE X-MOUS

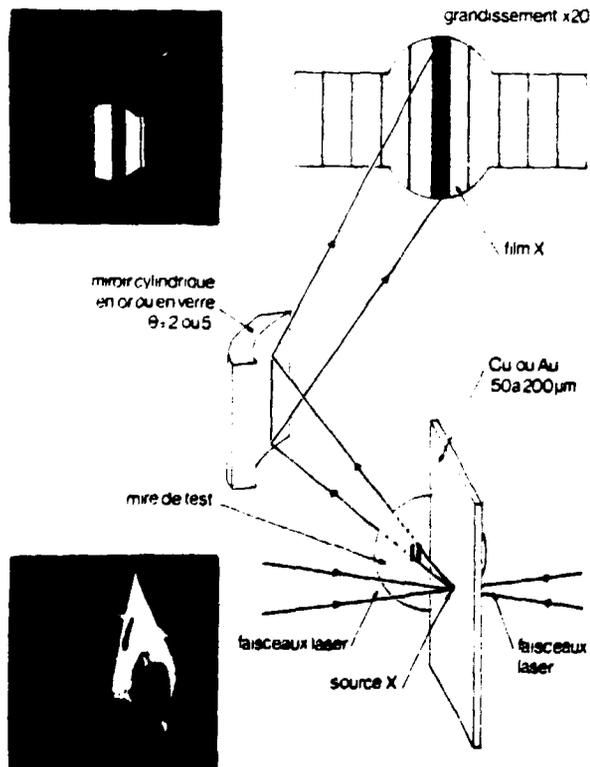


Figure 7.

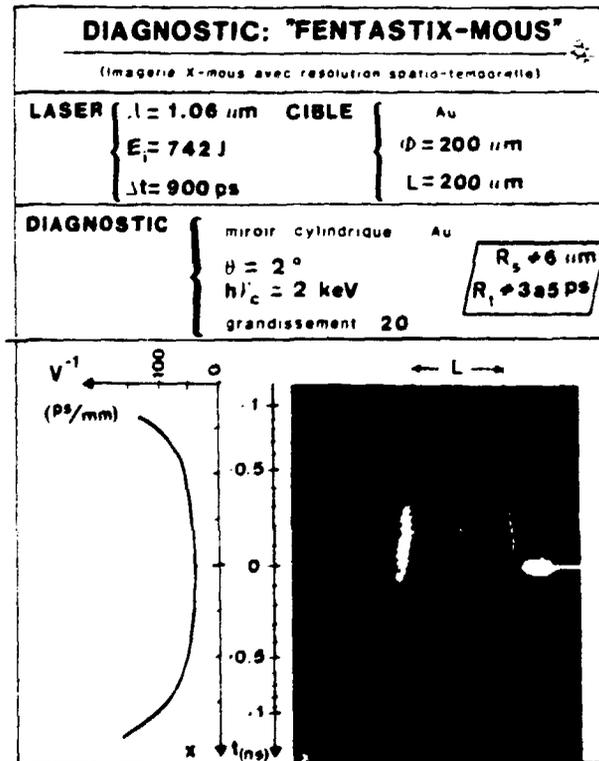


Figure 8. Observation de l'émission X dans le domaine 100 eV - 2 keV d'une cible en or au moyen du diagnostic "Fentastix-mous"

Sur la figure 8 on montre un exemple d'enregistrement obtenu sur la caméra P650X lors de l'irradiation d'un disque d'or de 200 μm de diamètre et de 200 μm d'épaisseur. Pour ce tir, l'énergie laser incidente sur la cible était de 742 J. La durée de l'impulsion était de 900 ps. Le disque est placé perpendiculairement à l'axe des fagots laser de manière que

quatre faisceaux soient focalisés sur chaque face. L'observation est effectuée dans une direction perpendiculaire. On voit que les zones émissives des deux plasmas créés s'éloignent de la cible à une vitesse de l'ordre de 5×10^6 cm/s. Sur la gauche du cliché est représentée la courbe donnant la vitesse de balayage en chaque point de l'écran de la caméra. Cette courbe met en évidence un défaut de la caméra prototype. En effet le balayage n'est utilisable que dans la partie centrale de l'écran pendant une durée approximative de 1 ns. Ce défaut d'électronique est lié à la conception même du tube où les plaques de déflexion sont intégrées dans la lentille de focalisation temporelle. Il devrait être supprimé dans la nouvelle version du tube bilamellaire P 750 X présenté dans une autre communication⁶.

Pour conclure, nous avons montré que l'association d'une caméra à optique bilamellaire performante avec une optique X relativement simple constitue un moyen de diagnostic dans le domaine X-mous très précieux pour les études de plasma créé par laser.

Nous tenons à remercier toutes les personnes dont les efforts quotidiens font progresser ces études et en particulier M. B. BOUTRY pour son travail sur la caméra P650X, Melle C. GEYNES, M. J.L. LARCADE, Mme M. MILLERIOUX et M. J.P. NEGRON pour la persévérance et la compétence technique qu'ils ont manifestées lors de la mise en oeuvre de "Fentastix-Mous".

Références

1. B. Boutry, C. Cavailler, N. Fleurot, "P600 - P650 X-ray streak camera with optimized spatio-temporal resolution," SPIE Vol. 348, High Speed Photography (San Diego 1982), p. 766
2. C. Bayer, M. Bernard, D. Billon, M. Decroisette, D. Galmiche, D. Juraszek, J. Launspach, D. Meynial, B. Sitt, "Implosion par laser de microballons : étude de la transition du régime d'explosion du pousseur au régime d'ablation," Nuclear Fusion, Vol. 24, n° 5 (1984).
3. C. Imhoff, P. Nodenot, C. Cavailler, N. Fleurot, J. Launspach, "Analyse des performances d'une nouvelle caméra à balayage de fente, TSN 506," 16ème Congrès de Photographie Rapide, 27-31 août 1984, Strasbourg, France.
4. Société R.T.C., La radiotechnique-Compelec, 130 avenue Ledru-Rollin, 75540 Paris Cedex 11
5. C. Cavailler, N. Fleurot, J. Launspach, R. Sauneuf, R. Verrecchia, "Soft X-ray P 550 streak camera : characteristics and applications," SPIE Vol. 348, High Speed Photography (San Diego 1982) p. 760.
6. A. Girard, C. Loty, J.P. Roux, "Le P 700 : un nouveau tube ultra-rapide à balayage de fente à optique lamellaire," 16ème Congrès de Photographie Rapide, 27-31 août 1984, Strasbourg, France.
7. R.S. Marjoribanks et al, "Time resolved X-ray spectrometry for laser-fusion studies," SPIE 348 198.
8. R.A. Lerche, G.E. Philipps, "Simultaneous recording of optical and X-ray signals in laser-fusion," A.P.S Meeting, New York, Octobre 1981 (UCRL 86405).
9. C.P. Hale et al, "Photo-emissive materials for 0.35 μ m Laser Fiducials in X-ray streak cameras," O.S.A., Boulder, mars 1984 (UCRL 90089).
10. R.A. Lerche, 1981 L.L.N.L. Laser Program Annual Report, 5-19.
11. F. Gex, R. Alexandre, D. Bauduin, C. Hammes, D. Horville, C. Cavailler, N. Fleurot, M. Nail, D. Mazataud, E. Mazataud, "Sensitization and performances of SI image converter tubes designed for laser fusion experiments," SPIE Vol. 348, High Speed Photography and Photonics (San Diego 1982) p. 821.
12. C. Cavailler, D. Gontier, J. Launspach, C. Froehly, D. Largeau, M. Vampouille, "Transmission analogique d'impulsions laser picosecondes dans les fibres optiques à saut d'indice," 16ème Congrès de Photographie Rapide, 27-31 août 1984, Strasbourg, France.
13. C. Cavailler, M. Genoud, N. Fleurot, J. Launspach, A. Mens, M. Mazataud, "Chaines de lecture électronique d'images associées à des caméras à balayage de fente picosecondes," 16ème Congrès de Photographie Rapide, 27-31 août 1984, Strasbourg, France.
14. C. Cavailler, Ph. Henry, J. Launspach, A. Mens, M. Rostaing, R. Sauneuf, "Utilisation d'un dispositif à transfert de charge (D.T.C.) dans une caméra X à sténopé," 16ème Congrès de Photographie Rapide, 27-31 août 1984, Strasbourg, France.
15. C. Cavailler, Ph. Henry, J. Launspach, J. De Mascureau, M. Millerieux, M. Rostaing, R. Sauneuf, "Mise en oeuvre d'un microscope de Wolter à lecture électronique pour l'acquisition d'images dans le domaine X-mou," 16ème Congrès de Photographie Rapide, 27-31 août 1984, Strasbourg, France.
16. C. Cavailler, N. Fleurot, A. Mens, "Caméras à vides instantanées et détection d'impulsions laser picosecondes à l'aide de senseurs solides D.T.C.," 16ème Congrès de Photographie Rapide, 27-31 août 1984, Strasbourg, France.
17. M. Lemonier, J.C. Richard, C. Cavailler, A. Mens, "Lecture d'images de caméras à balayage de fente picosecondes par D.T.C., 16ème Congrès de Photographie Rapide, 27-31 août 1984, Strasbourg, France.

18. B.L. Henke, P. Lee, T.J. Tanaka, R.L. Sminabukuro, B.K. Fujikawa, Atomic Data and Nuclear Data Tables, Vol. 27, 1, janvier 1982.

19. M. Bernard, D. Billon, J.L. Bocher, P. Combis, D. Juraszek, D. Meynial, "Effect of coating material in 1,06 μ m directly driven laser implosion," 16ème ECLIM, Londres, septembre 1983.