

PREMIER COLLOQUE IMAGE  
Traitement, Synthèse, Technologie et Applications

BIARRITZ — Mai 1984 —

---

MICROIMAGERIE X DE PLASMAS LASER PAR CODAGE MULTIFENTES  
LASER PLASMA X-RAY MICROIMAGING BY MULTISLIT CODED APERTURE

N. de BEAUCCOUDREY, L. GARNERO

Institut d'Optique, Université de Paris-Sud, B.P. 43 - 91406 ORSAY Cedex, France

---

**RESUME**

L'imagerie de l'émission X produite par les microplasmas induits par laser fournit de précieuses informations sur les caractéristiques de ces plasmas.

Nous présentons un nouveau mode de codage qui autorise des traitements essentiellement unidimensionnels, car le formalisme de reconstruction est analogue à celui de la tomographie axiale. Ce codage utilise un masque à fentes radiales et donne des images à haute résolution et bon rapport signal sur bruit. Cependant, on ne dispose pas de capacité tomographique, mais on peut la retrouver en modifiant le code par un décalage des fentes : à partir d'une seule image enregistrée, on reconstruit, avec le même formalisme que pour le code radial, différentes sections de la distribution tridimensionnelle d'émission en se focalisant sur chaque plan successivement, tout en brouillant les données venant des autres plans.

Les configurations des codes et des images de plasma de résolution 5-10  $\mu$  sont présentées.

**SUMMARY**

Imaging of X-rays emitted by laser induced microplasmas provides useful informations on plasma characteristics.

We present a new coding technique which allows mainly one-dimensional processing, because reconstruction formalism is analogous to axial tomography. This coding uses radial-slit mask and provides good resolution images with a high signal-to-noise ratio. Unfortunately, it doesn't provide tomographic capability, but this possibility can be recovered by modifying this code by a displacement of slits : from a single recorded image, we reconstruct, with the same formalism as for radial-slit decoding, different slices of the tridimensional source distribution by bringing successively into focus each individual plane, while other planes are blurred.

We present experiments and plasma images with lateral resolution around 5-10  $\mu$ m.



MICROIMAGERIE X DE PLASMAS LASER PAR CODAGE MULTIFENTES  
LASER PLASMA X-RAY MICROIMAGING BY MULTISLIT CODED APERTURE

N. de BEAUCCOUDREY, L. GARNERO

## 1. INTRODUCTION

L'imagerie de l'émission X produite par les microplasmas créés par laser est un diagnostic important, car la connaissance de la distribution volumique et du contenu spectral des rayons X émis apporte de précieuses informations sur les caractéristiques de ces plasmas.

Or, il est bien connu que les systèmes optiques classiques, basés sur la réfraction des rayons, ne sont pas transposables aux longueurs d'ondes des X, où les seuls moyens de formation d'images doivent utiliser, soit les phénomènes de réflexion (miroirs en incidence rasante, utilisation de multicouches) soit ceux d'absorption spatiale sélective du rayonnement par un masque placé entre le plasma émetteur et le détecteur. Le masque le plus simple et le plus souvent utilisé est le sténopé, simple trou dont le diamètre détermine la résolution spatiale. Malgré l'avantage d'obtenir directement une image du plasma émetteur, son inconvénient majeur réside dans sa très faible luminosité : le nombre de photons reçus sur le détecteur est très faible et diminue d'autant plus qu'on augmente la résolution.

Au contraire, les méthodes d'ouverture de codage permettent de combiner une bonne résolution avec une importante efficacité de collection de photons ; de plus, elles permettent généralement d'accéder à la résolution tomographique dans le plasma.

Nous rappelons que l'imagerie par ouverture de codage nécessite deux étapes successives : on enregistre d'abord l'émission X du plasma à travers un masque, appelé ouverture de codage ou code (des ouvertures variées sont ou ont été utilisées, en particulier : zones de Fresnel {1}, anneau {2}, codes aléatoires, ...) ; l'image codée obtenue est alors la convolution de la distribution volumique de la source avec la fonction de transmission de l'ouverture. Les informations contenues dans cette image codée n'étant pas directement utilisables sous cette forme, une seconde opération est nécessaire pour retrouver une image reconnaissable de l'objet ; cette reconstruction, ou décodage, dépend de la forme du code choisi et peut être faite optiquement ou numériquement. Les difficultés liées aux méthodes optiques, cohérentes ou incohérentes, font qu'elles sont progressivement abandonnées au profit des méthodes numériques ; mais la reconstruction d'images par ouvertures codées consiste le plus souvent en une déconvolution bidimensionnelle et nécessite des calculs importants.

C'est pourquoi, nous inspirant de travaux déjà effectués en médecine nucléaire {3}, nous avons développé un mode de codage par multifentes {4, 5}, qui utilise des traitements essentiellement unidimensionnels, à cause de la configuration particulière du code, qui est composé d'un grand nombre de fentes, à diverses orientations.

Nous allons maintenant décrire le principe de formation d'image par un tel codage avant de donner quelques résultats expérimentaux.

## 2. CODAGE PAR MULTIFENTES

L'image codée par les multifentes est l'ensemble des images codées individuellement par chaque fente, qui peuvent donc être analysées indépendamment les unes des autres (figure 1).

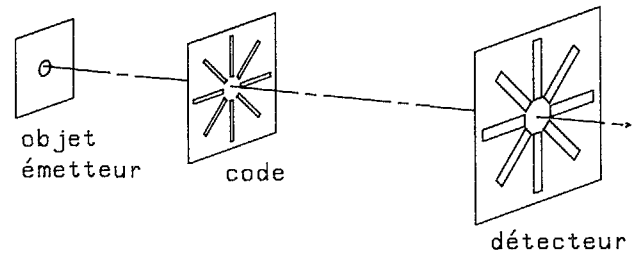


Figure 1 - Codage multifentes (exemple du code radial).

Regardons tout d'abord quelle est l'information contenue dans l'image codée par une fente unique :

### - Codage par une fente

A travers la fente, chaque point émetteur se projette sur le détecteur selon une ligne parallèle à la fente ; cette fente se comporte donc comme un sténopé dans sa petite dimension et donne, dans la direction perpendiculaire, l'intégrale de l'émission X : on obtient ainsi une "projection" de la source selon cette direction (figure 2 a). Toute l'information est contenue dans la petite dimension de l'image, la résolution finale correspondra à la largeur de la fente.

La contribution au gain en rapport signal sur bruit final est double : tout d'abord, en chaque point de l'image codée on reçoit les photons venant non pas d'un seul point émetteur, comme c'est le cas pour le sténopé, mais de toute une ligne de la source (considérée comme plane dans les deux cas) ; de plus, toutes les lignes perpendiculaires à la fente étant identiques au bruit près, on peut les sommer pour augmenter la statistique des photons sans rien changer au signal.

L'ensemble des fentes donne donc un ensemble de "projections" unidimensionnelles du plasma dans les directions correspondantes tout autour du plasma.

On a donc, à condition d'avoir pris un nombre de directions suffisantes, toutes les données nécessaires pour reconstruire une image du plasma en recombinaison numériquement ces différentes projections dans les bonnes directions.

Nous utilisons deux types de masques qui diffèrent par la position relative des fentes par rapport au centre du code (figure 3) ; c'est cette position qui permettra d'accéder ou non à une connaissance tomographique de la source.

### - Codage par fentes radiales (figure 3 a)

L'ensemble de ces projections nous ramène au formalisme de la tomographie axiale transverse (principe du scanner X) ; nous pouvons donc utiliser les algorithmes qui ont été développés ; nous avons choisi celui qui permet le traitement en plus grande partie à une dimension : filtrage de chaque projection unidimensionnelle, épandage et sommation aux différents angles.

Signalons toutefois que, contrairement aux méthodes générales d'imagerie par ouverture de codage, ce code particulier n'apporte pas de tomographie. En effet, les projections des différents plans en profondeur de l'objet se superposent sur le détecteur de la même façon pour toutes les directions ; on obtient donc, exactement comme pour le sténopé, une seule image qui est la projection de la source volumique sur un seul plan.

MICROIMAGERIE X DE PLASMAS LASER PAR CODAGE MULTIFENTES  
 LASER PLASMA X-RAY MICROIMAGING BY MULTISLIT CODED APERTURE

N. de BEAUCOUDREY, L. GARNERO

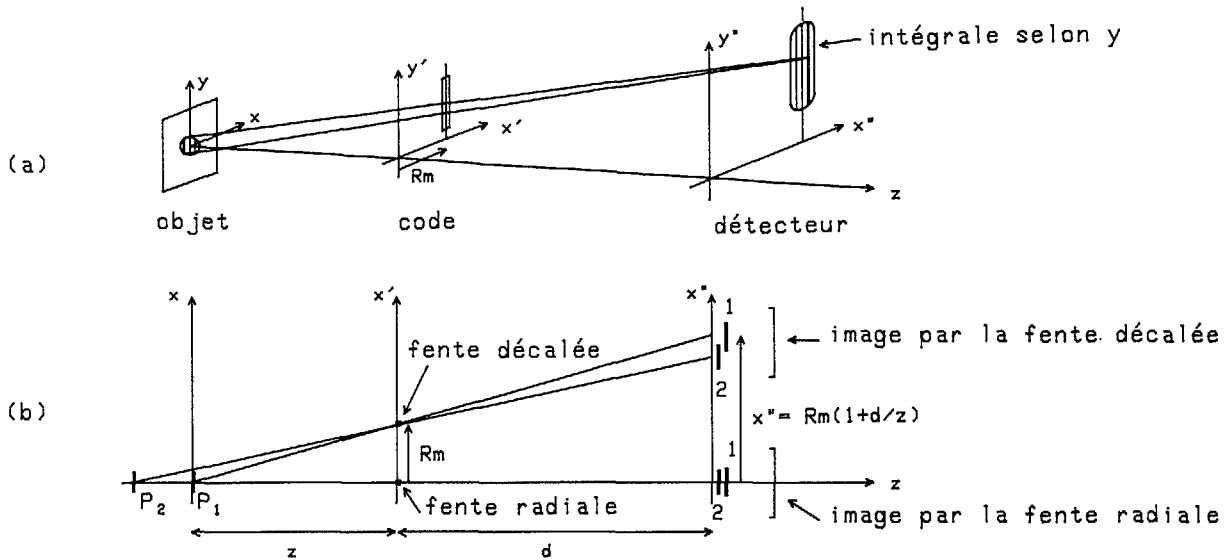


Figure 2 - Codage par une fente.

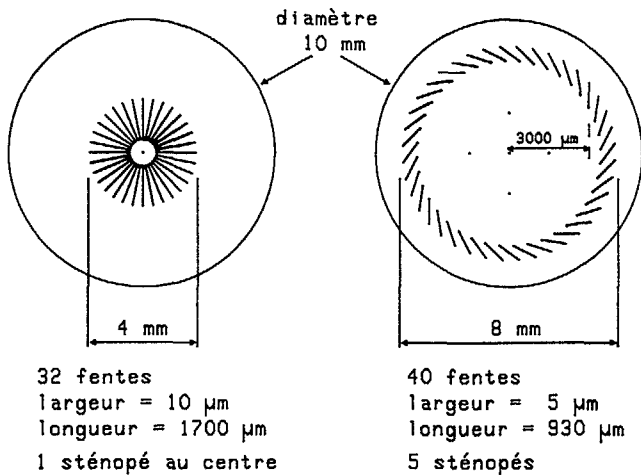


Figure 3 - Codes à fentes radiales (a) et décalées (b)

Cependant, ce code conserve un avantage en comparaison du sténopé par son gain en rapport signal sur bruit après reconstruction, qui est très important et permettra de choisir une bande étroite d'énergie par l'interposition de filtres appropriés.

- Codage par fentes décalées

A partir du code précédent, on peut obtenir un second code qui possède une capacité tomographique et ceci en décalant les fentes par rapport à l'axe de symétrie (figure 3 b).

Ainsi, à cause du décentrement des fentes ( $R_m$  sur les figures 2 b et 3 b), les différents plans se projettent en des positions différentes qui dépendent de la profondeur de ces plans, c'est-à-dire de leur distance  $z$  au plan du code, par la relation :

$$x'' = R_m \left( 1 + \frac{d}{z} \right) \quad (1)$$

où  $d$  est la distance, fixe, du plan du code à celui du détecteur.

C'est ce décalage variable de la projection des différents plans en profondeur qui va permettre de séparer les informations relatives à ces plans.

Ainsi, à partir d'une image enregistrée avec le code à fentes décalées, on reconstruit, avec le même formalisme que pour le codage radial, différentes sections de la distribution tridimensionnelle d'émission en se focalisant sur chaque plan successivement, tout en brouillant les données venant des autres plans ; cette focalisation s'effectue en translatant chaque projection de fente de la valeur  $-x''$  donnée dans l'équation (1). On obtient donc une série de coupes parallèles aux plans du masque et du détecteur.

Nous allons maintenant décrire les expériences que nous avons réalisées.

3. REALISATION EXPERIMENTALE ET RESULTATS

La configuration du système d'enregistrement dépend du type d'objets dont on veut faire des images ; nous nous sommes intéressés au cas des plasmas d'implosion par compression de microballons irradiés par deux faisceaux laser opposés (à  $0,26 \mu m$ ), les dimensions habituelles des plasmas ainsi créés étant de l'ordre de  $100 \mu m$ .

Les paramètres du système expérimental que nous avons définis ont été choisis pour obtenir la meilleure résolution possible tout en tenant compte des limitations pratiques, dont la principale est le peu de place disponible aux abords du plasma.

Les masques qui constituent les ouvertures codées ont été réalisés, par microlithographie et électro-déposition d'une couche de  $5 \mu m$  d'or et de  $10 \mu m$  de nickel, pour absorber, en dehors de l'ouverture choisie, les rayons X émis par le plasma, qui se situent dans un domaine d'énergie autour de  $1$  à  $10 \text{ keV}$ .

Les dimensions respectives des deux types de codes sont indiquées sur la figure 3. Pour le code à fentes décalées, le décalage a été choisi le plus grand possible ( $3000 \mu m$ ) compatible avec l'ouverture maximale acceptable. En effet, la résolution tomographique est directement reliée à cette distance  $R_m$ , par la relation :



MICROIMAGERIE X DE PLASMAS LASER PAR CODAGE MULTIFENTES  
LASER PLASMA X-RAY MICROIMAGING BY MULTISLIT CODED APERTURE

N. de BEAUCOUDREY, L. GARNERO

$$\delta_z = \delta_\ell R_m/z_0 \quad (2)$$

où  $\delta_\ell$  est la résolution latérale et  $z_0$ , la distance moyenne du plasma au plan du code. Dans les deux cas, on a placé dans la région centrale un ou plusieurs sténopés servant de référence, pour le positionnement de l'image codée et pour une comparaison entre les deux types d'images.

La distance du plan du code à la position moyenne du plasma est de 1 cm ; cette distance est suffisamment proche pour avoir une bonne qualité d'image sans que le masque ne risque trop d'être détérioré par les projections du plasma.

La distance du code au détecteur a été déterminée pour permettre un grandissement assez important de l'ordre de 15, afin de ne pas être limité par la résolution du détecteur, tout en gardant des dimensions raisonnables.

Actuellement, le détecteur utilisé est un film X sensible. L'image enregistrée sur ce détecteur a une étendue globale de 13 cm de diamètre. L'emploi de films nécessite une numérisation sur microdensitomètre. Les données, une fois numérisées, doivent subir un traitement préalable à la reconstruction proprement dite pour recalculer la contribution de chaque fente. Cette étape est beaucoup plus importante que la reconstruction, c'est pourquoi nous envisageons l'utilisation prochaine de détecteurs du type CCD linéaires qui fourniront directement les données nécessaires, les "projections", et supprimeront ce précalcul actuel.

#### RESULTATS

La figure 4 montre les images obtenues dans trois expériences avec le premier code à fentes radiales : dans chaque cas, on a, en haut, l'image sténopé de référence et, en-dessous, l'image correspondante reconstruite à partir des projections des fentes. Le gain en rapport signal sur bruit y est très net.

La figure 5 donne un résultat d'expérience avec le code à fentes décalées ; on a représenté 5 coupes du même plasma, séparées d'environ 15  $\mu\text{m}$ , ainsi que l'image sténopé correspondante.

#### 4. CONCLUSION

Nous avons présenté une double méthode de codage multifentes, qui permet d'obtenir des images de microplasmas à très haut rapport signal sur bruit et atteignant des résolutions de 5 à 10  $\mu\text{m}$ . Le codage à fentes décalées fournit en plus une capacité tomographique, souvent nécessaire pour une meilleure connaissance de ces plasmas. Les premiers résultats présentés sont très prometteurs, bien que des améliorations soient encore à apporter. Entre autres, sur le plan expérimental, l'emploi de détecteurs appropriés permettrait une imagerie quasiment en temps réel ; en ce qui concerne la reconstruction tomographique, de nouvelles méthodes de discrimination tridimensionnelle, que nous étudions actuellement, permettront d'obtenir des images plus significatives.

#### REFERENCES

- {1} N.M. Ceglie, D.T. Attwood and E.V. George, J. Appl. Phys. 48 (1977) 1566.
- {2} J. Brunol, R. Sauneuf and J.P. Gex, Optics Comm. 31 (1979) 129.
- {3} M.A. Kujooory, E.L. Miller, H.H. Barrett, G.R. Gindi and P.N. Tamura, Appl. Optics 19 (1980) 4186.
- {4} N. de Beaucoudrey, Optics Comm. 44 (1983) 232.
- {5} N. de Beaucoudrey, L. Garnero, Optics Comm. 49 (1984) 103.

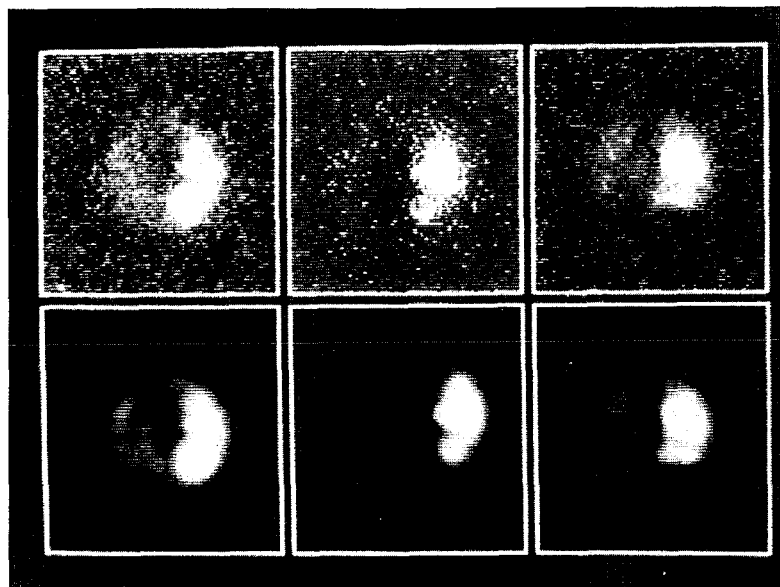


Figure 4 : 3 expériences avec le code à fentes radiales (en bas) comparaison avec un sténopé (en haut)

MICROIMAGERIE X DE PLASMAS LASER PAR CODAGE MULTIFENTES  
LASER PLASMA X-RAY MICROIMAGING BY MULTISLIT CODED APERTURE  
N. de BEAUCCUDREY, L. GARNERO

---

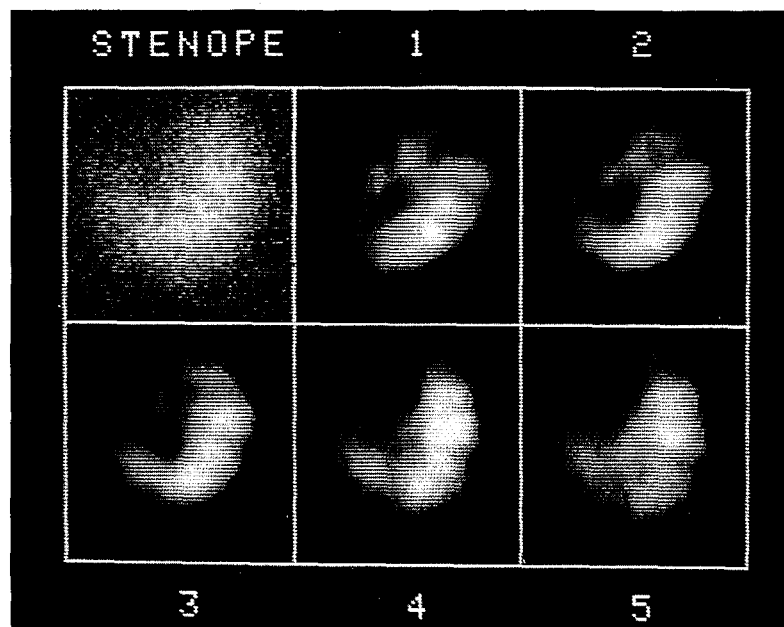


Figure 5 : 5 coupes d'un plasma reconstruites avec les fentes décalées ; image sténopé correspondante.