

Lasers collisionnels à 41.8 nm en régime guidé

I. Bettaïbi¹, S. Sebban¹, T. Mocek¹, C.M. McKenna², B. Cros³, A. Butler²,
D.J. Spence², G. Maynard³, A.J. Gonsavles² et S.M. Hooker²

¹ *Laboratoire d'Optique Appliquée (LOA), ENSTA-École Polytechnique,
Chemin de la Hunière, 91761 Palaiseau, France*

² *Department of Physics, University of Oxford, Clarendon Laboratory,
Parks Road, Oxford OX1 3PU, UK*

³ *Laboratoire de Physique des Gaz et des Plasmas, Université Paris-Sud,
Bâtiment 210, 91405 Orsay, France*

Résumé. Nous présentons des résultats expérimentaux sur la réalisation d'un laser à 41.8 nm en régime guidé. Deux types de guides d'onde ont été utilisés : des capillaires à décharge électrique et des tubes capillaires diélectriques.

1. INTRODUCTION

Suite à la démonstration au LOA de l'amplification d'une raie laser à 41.8 nm dans le xénon IX et ensuite à 32.8 nm dans le krypton IX [1,2], plusieurs expériences ont permis d'optimiser, caractériser et développer ce type de sources. Le milieu amplificateur est ici un plasma d'ions multichargés (Xe IX ou Kr IX) créé par la focalisation d'un laser intense (1J, 30 fs) dans un milieu gazeux. Les transitions laser sont respectivement 5d-5p et 4d-4p pour les ions Xe IX et Kr IX, à 41,8 et 32,8 nm. Le schéma d'inversion de population est un schéma dit "collisionnel". Il fonctionne comme un laser à 3 niveaux. Le niveau supérieur de la transition est peuplé par excitations collisionnelles (collisions électrons-ions) à partir du niveau fondamental de l'ion huit fois chargé alors que le niveau inférieur se dépeuple rapidement vers le niveau fondamental par transitions radiatives. Pour favoriser les collisions et donc le pompage, le laser qui crée le plasma amplificateur est polarisé circulairement. Dans ces conditions des électrons plus énergétiques sont produits et favorisent de forts taux de pompage. Ces sources délivrent un rayonnement XUV parfaitement monochromatique et d'une durée de quelques ps. Pour une longueur de plasma de l'ordre de 4 mm, le nombre de photons extraits est de l'ordre de 5×10^9 photons/impulsion à une cadence de 10 Hz.

Une limitation importante à l'amélioration des performances de ce type de laser XUV est la propagation du laser de pompe sur une grande longueur. En effet, le laser de pompe est fortement réfracté au cours de sa propagation ce qui limite la longueur active du plasma. Une solution consiste à utiliser des guides d'onde qui permettent de conserver une intensité laser suffisante pour l'ionisation du plasma sur des longueurs centimétriques. Nous nous sommes intéressés à deux types de systèmes : des capillaires à décharge électrique et des tubes capillaires en saphir.

2. GUIDAGE DANS DES TUBES À D'ÉCHARGES ÉLECTRIQUES

Ce type de guide d'onde repose sur la création par décharge électrique d'un canal plasma dans un tube capillaire rempli de gaz. Au cours de l'évolution du plasma, marquée essentiellement par la conduction thermique des électrons aux parois internes du tube, il se forme un profil de densité électronique radial parabolique (avec une plus forte densité sur les bords qu'au centre). Le gradient d'indice de réfraction résultant permet au milieu de jouer le rôle d'une lentille convergente tendant à contrebalancer la réfraction

naturelle du laser dans le milieu gazeux. Ce type de guide d'onde a montré sa capacité à guider des intensités de l'ordre de $10^{17} \text{ W.cm}^{-2}$ sur plusieurs centimètres dans des tubes capillaires à décharges électriques remplis d'hydrogène [3].

L'expérience a été réalisée sur les installations du LOA en utilisant un laser Titane Saphir à 820 nm, délivrant des impulsions de 1 J et de 37 fs de durée à mi-hauteur [4]. Le faisceau est d'abord polarisé circulairement grâce une lame quart d'onde avant d'être focalisé avec un miroir parabolique hors axe de un mètre de focale à l'entrée du tube capillaire. Le rayon de la tache focale est de $34 \mu\text{m}$, ce qui correspond à une longueur de Rayleigh de 4,4 mm pour un faisceau gaussien. L'intensité maximale dans le plan focal est de $2,5 \times 10^{17} \text{ W/cm}^2$. Le système d'imagerie en champ proche est composé de deux lentilles L1 et L2, trois lames prismatiques (W1, W2, W3), de 4% de transmission chacun, permettant d'atténuer l'intensité du faisceau transmis avant de le faire sortir de l'enceinte, et une caméra CCD 12 bits (figure 1). Ce système permet d'imager le faisceau à la sortie du capillaire et ainsi calculer la transmission en le comparant avec l'image sans capillaire. La première lame W1 est amovible, ce qui permet de laisser passer le faisceau laser XUV vers un spectromètre à transmission composé d'un réseau à transmission de 2000 traits/mm, d'un miroir sphérique en incidence rasante et d'une caméra CCD X. Un filtre d'Aluminium de $0,3 \mu\text{m}$ d'épaisseur disposé devant le réseau permet de couper le faisceau infrarouge de pompe.

Les tube capillaire utilisés font 30 mm de longueur et $210 \mu\text{m}$ de diamètre. Il sont alimentés en permanence par un réservoir de xénon/hydrogène à travers deux trous situés à 3 mm de ses faces d'entrée et de sortie, afin qu'il y règne une pression constante et homogène. Une décharge électrique délivrée par une capacité de 4,5 nF est injectée par une électrode située au centre du capillaire. L'impulsion de courant est de profil sinusoïdal avec 1 ps de demi période et un maximum d'intensité de 105 A. Les paramètres qui nous permettent d'optimiser le signal du laser X sont la pression, la proportion de xénon et d'hydrogène, le délai entre la décharge et l'impulsion laser.

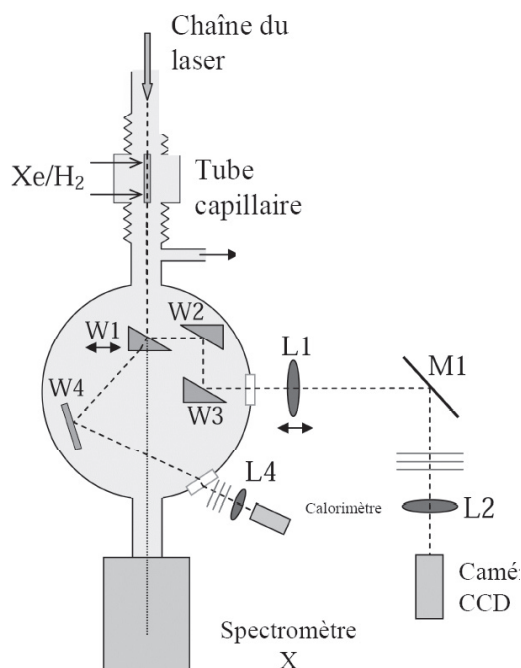


Figure 1. Dispositif expérimental.

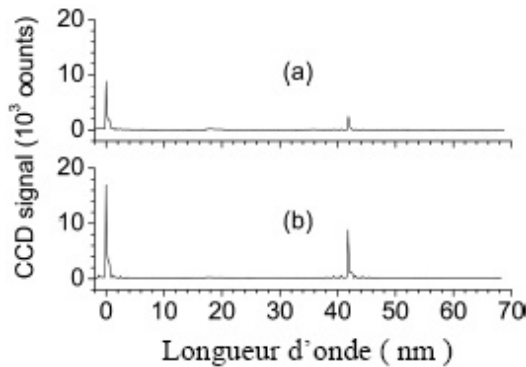


Figure 2. Spectres d'émissions du plasma : dans la cellule de 4mm (a) et dans le capillaire (b).

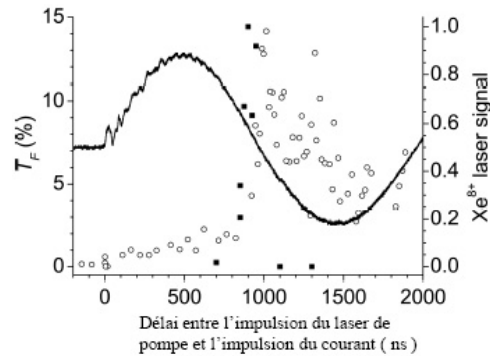


Figure 3. La transmission (cercles) du laser IR, intensité du laser à 41.8 nm (carrés) et l'intensité du courant en fonction du temps.

Le meilleur signal a été obtenu pour une pression de 120 mbar de xénon et d'hydrogène dont 1/3 de xénon. Comme le montre la figure 2 le signal à 41.8 nm est quatre fois supérieur à celui obtenu dans une cellule de 4 mm à 20 mbar (pression optimale en cellule). De plus comme le montre la figure 3 l'apparition du signal à 41.8nm est étroitement lié aux conditions de guidage qui semblent être particulièrement favorable 1000 ns après le début de la décharge électrique. Pour des délais plus importants, le signal du laser à 41.8nm disparaît, bien que la transmission reste relativement importante. L'observation d'une amplification laser sur une gamme étroite de temps montre que les conditions de guidage sont très sensibles à l'hydrodynamique du plasma préformé par la décharge [5].

Toutefois il faut souligner que l'augmentation du signal à 41.8 nm lié à l'utilisation du guide par décharge électrique de 30 mm de long n'est pas proportionnelle à l'accroissement de la longueur du milieu amplificateur quand on le compare directement au signal mesuré avec une cellule de 4 mm. Ceci est dû à l'utilisation d'un mélange H_2/Xe (capillaire) au lieu de xénon pur (cellule); la présence de H_2 contribue à faire chuter fortement la température électronique du plasma et donc à réduire sensiblement l'efficacité du pompage et le coefficient de gain. Si une étude détaillée des effets de mélanges de gaz sur les qualités amplificatrices du plasma est à mener, il est intéressant de noter que, malgré une baisse probable des qualités amplificatrices du plasma dans le cas d'un mélange Xe/H_2 , le guidage sur 30 mm du laser de pompe permet malgré tout une amélioration sensible des performances obtenues en cellule de gaz.

3. GUIDAGE MULTIMODES DANS DES TUBES DIÉLECTRIQUES

Un autre type de guide d'onde, bien plus simple dans son principe, a été utilisé : des tubes de saphir et en verre. Le guidage est ici réalisé par réflexions sur les parois internes des capillaires. Les conditions de continuité sur les parois imposent des modes bien définis, pouvant se propager dans le capillaire. Leur nombre dépend du rapport entre le diamètre du faisceau à l'entrée et le diamètre du tube [6,7]. Lorsque ces deux derniers sont de valeurs proches, un seul mode peut se propager. Toutefois les capillaires de dimensions proches de celle de la tache focale se dégradent de façon irréversible au bout de deux à trois tirs. Pour ces raisons nous avons utilisé des tubes de plus gros diamètre (300 μm de diamètre). Le montage expérimental est similaire à celui décrit ci-dessus. Le miroir parabolique est remplacé par un miroir sphérique de deux mètres de focale. L'intensité maximale est autour de $10^{18} W/cm^2$. Le capillaire fait 15 mm de long et $300 \pm 10 \mu m$ de diamètre. Le waist mesuré est de $28 \pm 2 \mu m$ et la longueur de Rayleigh est de 4 mm. La petite dimension du faisceau devant le diamètre du tube permet à plusieurs

modes de s'y propager. Comme le montre la figure 4, le guidage du laser de pompe est fortement multi-modes.

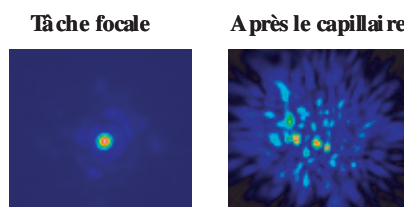


Figure 4. L'image du faisceau dans le plan focal et à la sortie du tube.

La figure 5 montre l'intensité du signal à 41.8 nm en fonction de la longueur du milieu amplificateur (pour une cellule de gaz et un capillaire de 15 mm de long). Dans un premier temps il est important de noter que l'utilisation d'un miroir sphérique de plus longue focale que celles utilisées jusqu'à présent permet d'accroître sensiblement la longueur du milieu amplificateur et donc les performances du laser à 41.8 nm. Dans de bonnes conditions de guidage par le capillaire, le signal à 41.8 nm est jusqu'à sept fois plus important que dans une cellule de même longueur et 43 fois plus important que dans une cellule de 4 mm de long. De plus, le guidage du faisceau a permis de travailler à plus haute pression et sur une gamme plus étendue, comme le montre la figure 6.

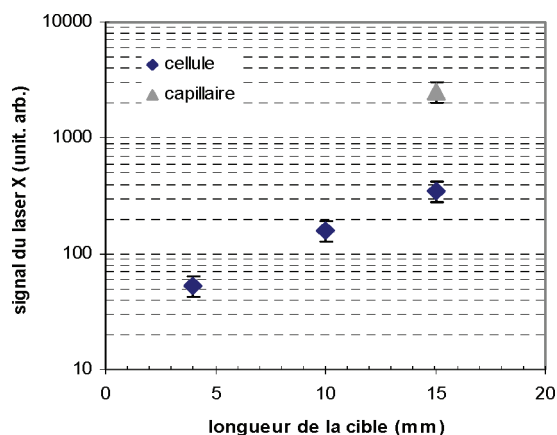


Figure 5. Intesnsité du laser X dans le capillaire et dans des cellules de différentes longueurs.

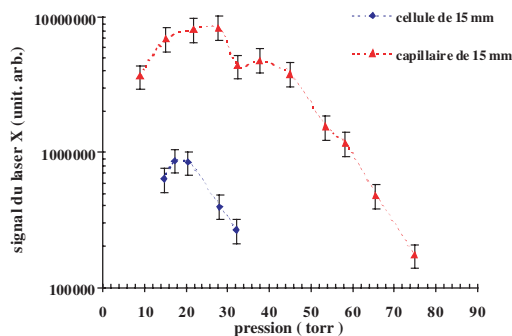


Figure 6. Intensité laser à 41.8 nm en fonction de la pression du gaz.

Le guidage n'agit pas seulement sur les performances du laser mais aussi sur la qualité spatiale du faisceau. La figure 7 présente trois empreintes de faisceau à 41.8 nm : (a) dans une cellule de 4 mm de long en utilisant un miroir sphérique de 1 mètre de longueur focale, (b) dans une cellule de 8 mm en utilisant un miroir sphérique de 2 m de longueur focale, (c) dans un tube capillaire de 25 mm en utilisant un miroir sphérique de longueur 2 m de focale. Dans toutes les configurations le faisceau mesuré est assez inhomogène comme c'est le cas pour tous les types de laser XUV de durée ps. Toutefois, on observe une réduction claire de la divergence du laser à 41.8 nm, liée à une élongation importante du plasma amplificateur : elle est de l'ordre de 4 mrad quand un capillaire de 25 mm de long est utilisé.

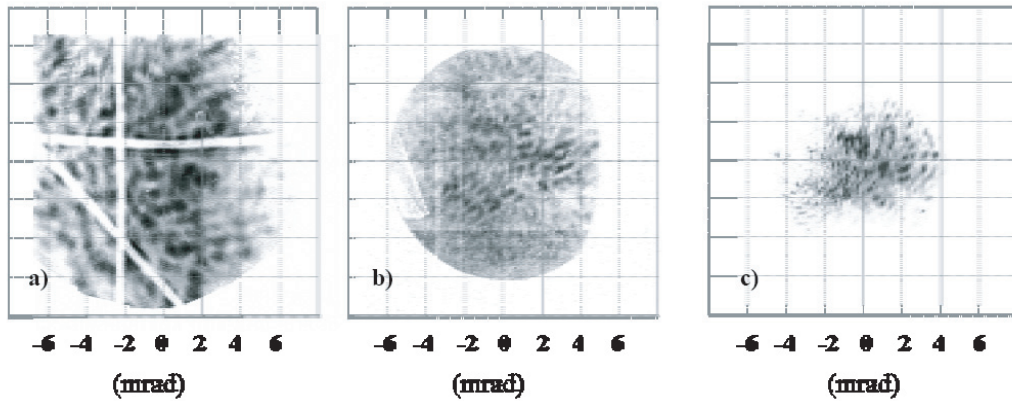


Figure 7. Empreinte du faisceau à 41.8 nm: (a) dans une cellule de 4 mm de long avec 1 m de focale, (b) dans une cellule de 15 mm de long avec une focale de 2 m. (c) dans un capillaire diélectrique de 15 mm de long avec une focale de 2 m.

4. CONCLUSION

Cette étude a permis de démontrer la possibilité de générer du laser XUV en régime guidé. Elle montre l'intérêt réel qu'apporte le guidage pour augmenter l'intensité du laser X et améliorer la qualité spatiale de son faisceau. En utilisant ce type de guide d'onde l'énergie du laser à 41.8 nm est proche de 1 μ J et la divergence du faisceau est de l'ordre de 4 mrad.

Bibliographie

- [1] S. Sebban, R. Haroutunian, P. Balcou, *et al.*, Phys. Rev. Lett. **86**, 3004 (2001).
- [2] S. Sebban *et al.*, Phys. Rev. Lett. **89**, 253901 (2002).
- [3] A. Butler, D.J. Spence and S.M. Hooker, Phys. Rev. Lett. **89**, 185003 (2002).
- [4] M. Pittman *et al.*, Appl. Phys. B **74**, 529 (2002).
- [5] D.J. Spence *et al.*, J. Opt. Soc. Am. B **20**, 138 (2003).
- [6] F. Dorchies *et al.*, Phys. Rev. Lett. **82**, pp. 4655, 1999.
- [7] R.L. Abrams, IEEE J. Quantum Electron. **8**, 838 (1972).