Réalisations et perspectives des lasers X : impulsions courtes et applications

Ph. Zeitoun, F. Albert, A. Carillon, O. de La Rochefoucauld, P. Fourcade,
P. Jaeglé, G. Jamelot, S. Hubert, A. Klisnick, M. Maillard, D. Ros,
S. Sebban et B. Rus

Laboratoire de Spectroscopie Atomique et Ionique, bâtiment 350, Université Paris-Sud,
91405 Orsay, France

Résumé : Nous présentons nos travaux visant à diversifier la gamme des lasers X (13.9 à 25.5 nm) utilisables au LULI grâce à la mise en place de nouveaux modes de pompage. Les premiers résultats de l'étude, par interférométrie laser X, de surfaces soumises à un champ électrique intense sont décrits et discutés.

1. INTRODUCTION : EVOLUTION DU LASER X AU LSAI DEPUIS 1996 (UVX '96)

Depuis quelques années les recherches sur les lasers X se diversifient avec l'utilisation de nouvelles techniques de pompage (laser fs et décharges électriques). Les travaux les plus récents sur le pompage par décharges électriques sont décrits dans ce recueil par D. Hong du GREMI - Orléans. Les études expérimentales réalisées en France -collaboration LOA/LSAI- sur l'utilisation de lasers femtosecondes (typiquement 20-50 fs) pour produire un laser X sont encore à un stade trop préliminaires pour nécessiter d'être abordées dans ce texte.

Indépendamment de cette évolution liée aux systèmes de pompage, ces dernières années ont été marquées par un élargissement important des sujets couverts par nos recherches sur le laser X pompé par un laser de forte énergie et de durée moyenne (nous verrons par la suite les durées typiques qu'englobe ce terme). Depuis 1991, date de la première observation du laser X à 21.2 nm au LULI, nous avons acquis une bonne connaissance et maîtrise de cette source. Récemment nous avons débuté l'étude de deux nouveaux modes de pompage (pompage synchrone par impulsions de 130 ps et pompage hybride) réalisables sur les installations du LULI. Les résultats les plus importants sont résumés dans la deuxième partie de ce texte.

Par ailleurs, une part importante de nos travaux a été réservée aux développements des applications des lasers X. La première application réussie fût la luminescence de cristaux ioniques induite par laser X [1]. Ensuite nous avons débuté des recherches sur l'interaction laser X-matière à haut flux, l'ionisation à deux photons, le photopompage du sodium mais les résultats les plus marquants ont été obtenus sur l'expérience d'étude de surfaces soumises à un champs électrique intense, que nous présenterons dans la troisième partie.

L'ensemble de ces travaux, aussi bien sur le pompage des lasers X que sur les applications, a montré clairement que les optiques X actuellement disponibles ne répondaient plus à nos besoins croissants. Les réflectivités à 21.2 nm restent faibles (~30%), il est très difficile de focaliser efficacement le laser X, les lames séparatrices réalisables actuellement sont trop absorbantes (env. 4 % de transmission à 21.2 nm). Ces dernières années, nous avons beaucoup travaillé sur l'optique X et en particulier sur la réalisation de lentilles ou sur les lames séparatrices. Nous avons ainsi fait réaliser une lentille capable, théoriquement, de focaliser le laser à 21.2 nm en un point de $1.5 \times 3 \mu\text{m}^2$ produisant une intensité de 10^{13} Wcm^{-2} . De nombreuses études sont encore nécessaires avant d'espérer répondre aux besoins croissants des lasers X mais aussi des autres sources X (harmoniques d'ordre élevé)

2. EVOLUTION DU POMPAGE DES LASERS X : VERS DES SYSTEMES MULTI-IMPULSIONNELS

La physique des lasers X est particulièrement complexe et ne peut être décrite ici en détail. Cependant nous allons essayer de donner certains repères permettant de comprendre le grand intérêt que nous portons aux nouveaux modes de pompage.

Le milieu amplificateur du laser X est, le plus souvent, un plasma d'ions multichargés produit par la focalisation, en une ligne, d'un laser de forte puissance. Cette géométrie est un compromis entre l'obtention d'une intensité aussi élevée que possible pour produire une inversion de population et la réalisation d'un milieu suffisamment long pour fortement amplifier l'émission laser X. (*L'intensité de sortie varie en $\exp(G \times L)$ où G est le gain en cm^{-1} et L la longueur d'amplification, pour un $G \times L$ inférieur à 15 typiquement. Au delà de cette valeur, l'intensité varie linéairement avec L , effet de saturation*). L'inversion de population étant produite par collisions entre les électrons libres du plasma et les ions lasants, plus le plasma est chaud, plus l'excitation collisionnelle sera élevée, avec un maximum autour de 2 keV pour le zinc néonoïde (Zn^{20+} , laser à 21.2 nm). Le laser de pompe assure jusqu'à maintenant aussi la fonction de produire les ions lasants -néonoïdes (10 électrons) ou nickelloïdes (28 électrons)-. Il faut noter que la température électronique permettant de produire un maximum d'ions lasants est toujours nettement inférieure (200 eV pour Zn^{20+}) à celle nécessaire pour atteindre le plus fort taux d'excitation collisionnelle (2 keV). Ce problème apparent peut-être limité en utilisant un laser de pompe de durée de plus en plus courte ce qui permet de tirer avantage du fait que la cinétique d'ionisation est nettement plus lente (≈ 1 ps) que le chauffage des électrons (quasi-instantané). Nous sommes ainsi passés d'impulsions de 600 ps produisant un gain de 5 cm^{-1} sur Zn^{20+} et d'environ 1 cm^{-1} sur l'argent nickelloïde (Ag^{19+} , $\lambda = 13.9 \text{ nm}$) à un laser de pompe de 130 ps donnant des gains allant jusqu'à 15 cm^{-1} sur Fe^{16+} et de 6 cm^{-1} sur Ag^{19+} . Très récemment nous avons mené cette démarche plus loin en découplant le laser produisant le plasma (long) du laser assurant le chauffage des électrons (court). Toujours sur l'argent nous avons ainsi obtenu des gains de 15 cm^{-1} grâce à la combinaison de deux impulsions laser respectivement de 500 ps et de 0.35 ps. Cette optimisation des lasers de pompe a comme effet de réduire notablement l'énergie nécessaire à produire un laser X fortement amplifié, de typiquement 450 J à 20 J environ (cas de l'Ag).

Relativement indépendamment de l'action que l'on peut avoir sur l'inversion de population, il est intéressant de travailler sur la propagation du laser X dans le plasma. Ce travail est vaste. Un aspect important de cette étude est lié à l'utilisation d'un miroir de demi-cavité. Précisons qu'avec un laser de pompe de 600 ps, le gain dure environ 200 ps ce qui permet au plus d'effectuer un double passage dans la plasma -de 2 cm de long-. Le double-passage permet d'accroître fortement l'intensité du laser X ainsi que sa cohérence transverse [2]; il est donc indispensable pour les expériences d'applications.

Le plasma étant un milieu très chaud et dense, il se détend violemment dans le vide engendrant d'importants gradients de densité électronique dans les plans parallèle et perpendiculaire à la cible et donc des gradients d'indice optique. Le réglage de la demi-cavité doit prendre en compte ces gradients comme on peut le constater sur la figure 1. Sur l'image à 5 mrad on observe un faisceau s'écartant de l'axe dans le plan horizontal et ayant deux lobes dans le plan vertical. Ceci est typique de l'action de la réfraction sur le laser X. En modifiant le réglage de la demi-cavité dans le plan horizontal deux effets apparaissent : on peut rendre maximum l'énergie totale (3 mrad - fig. 1 b) ou une pseudo-brillance (-1 mrad - fig. 1c) (*La brillance est un paramètre clé pour caractériser l'émission d'une source car elle quantifie sa capacité à être focalisée ou transportée sur une grande distance. Ne connaissant pas la taille de source pour ces différents cas, nous donnons ici une pseudo-brillance*). Ce dernier cas est intéressant car nous n'avons jamais testé ce réglage qui donne un faisceau extrêmement collimaté, tout en étant assez énergétique, ce qui représente donc un excellent compromis pour son utilisation sur des expériences d'applications.

Figure 1 : Sections du faisceau laser X pour différents réglages de la demi-cavité : 5 mrad (a), 3 mrad (b) et -1 mrad (c). Le miroir est en auto-collimation avec le laser X pour un angle de 7 mrad. Plus l'image est claire, plus le faisceau est énergétique. L'image couvre ~ 6 mrad dans les deux axes.

Par ailleurs, afin de réaliser une cavité complète on peut essayer de régénérer le gain avec une nouvelle impulsion laser chaque fois que le laser X revient dans le plasma. Théoriquement ce système permet l'utilisation effective d'une cavité complète mais se heurte à différents obstacles techniques. Le premier consistant à produire du gain sur plusieurs impulsions consécutives a été franchi avec succès comme le montre la figure 2a. On peut observer ici l'émission laser à 25.5 nm (Fe^{26+}) en simple passage pompée par deux impulsions de 130 ps de durée et séparées de 800 ps. L'image 2b a été obtenue lors de l'unique essai de double passage réalisé au LULI. On observe nettement les deux émissions réfléchies sur le miroir de demi-cavité.

Figure 2 : Emission à 25.5 nm résolue angulairement et temporellement en simple (a) et double passage (b). Deux impulsions lasers séparées de 800 ps ont été utilisées pour pomper le plasma.

L'évolutions rapides des conditions de plasma n'ont pas permis de bien synchroniser le laser X et le laser pompe, ni de régler convenablement l'angle de la demi-cavité. A raison d'un tir toutes les 20 mn, on comprend aisément que notre effort porte maintenant sur l'utilisation de codes numériques capables de simuler l'hydrodynamique du plasma et la propagation du laser X en multi-passages de manière à nous guider pour les prochaines expériences.

3. APPLICATIONS DES LASERS X : ETUDE DE SURFACES SOUMISES A UN CHAMP ELECTRIQUE INTENSE

L'intérêt de l'expérience d'étude de surfaces soumises à un champs électrique intense est principalement lié à la réalisation d'accélérateurs de particules pouvant atteindre le TeV. Suivant les spécifications du projet TESLA, le champ accélérateur devra être d'environ 30 MV/m soit environ 60 MV/m sur les parois. Ces parois sont en niobium refroidi à quelques °K afin de devenir supraconductrices. Les premiers essais ont montré qu'il était extrêmement difficile d'atteindre et surtout de maintenir de tels champs en raison de divers phénomènes parasites produisant au final une émission électronique et par conséquent un retour de l'état supraconducteur à l'état normal du niobium. La naissance de ces émissions électroniques reste toujours un sujet d'intenses recherches. Par l'utilisation d'un interféromètre X [3] et du laser à 21.2 nm nous avons réaliser la cartographie de surfaces de niobium, durant l'application d'un champ électrique, avec des résolutions en altitude de 2 nm sur des champs de $10 \times 0.5 \text{ mm}^2$. Ces données étaient corrélées avec des mesures de courant indiquant s'il y a eu une émission électronique. L'échantillon de Nb doit être superpoli ($\sim 1 \text{ nm rms}$) pour que l'on puisse produire des franges d'interférences utilisables, ce qui est loin des états de surface classiquement réalisés pour les accélérateurs. Cette expérience se situe donc *en amont* des travaux réalisés jusqu'à maintenant dans ce domaine et elle a le grand intérêt de pouvoir étudier quasi-individuellement un phénomène (ici la déformation de la surface par le champ électrique).

Sur la figure 3, nous avons présenté un interférogramme réalisé sans champ électrique; il sert de référence. La stabilité du laser X et du montage mécanique a été testé en comparant cette image à deux autres réalisées 20 et 40 mn plus tard. Elles sont identiques, à la résolution près.

Figure 3 : Interférogramme de référence. On observe nettement une structure horizontale faisant apparaître un défaut de surface.

Ensuite nous avons augmenté le champ par paliers en suivant cette procédure : le champ est augmenté après le tir laser X, est maintenu constant pendant 20 mn, puis un interférogramme est réalisé et on change

à nouveau la valeur du champ. Les images suivantes (4 a, b, c et d) montrent la soustraction de deux interférogrammes, celui obtenu sous champ à celui de référence. Pour un champ de 9 MV/m (a), il n'y a pas d'évolution visible de la surface. A 25 MV/m, on observe la croissance d'une structure inexistante auparavant et touchant le défaut initial. Quand nous avons augmenté le champ jusqu'à 35 MV/m, une microdécharge a été détectée sur le picoampèremètre puis nous avons enregistré l'interférogramme utilisé pour la figure 4c. L'image 4 c montre d'une part la disparition de la structure de l'image 4b et d'autre part l'accroissement important du défaut originel. Le champ étant maintenu à 35 MV/m, nous avons eu la surprise de voir la morphologie de ce défaut être complètement modifiée. Il nous est encore impossible d'expliquer l'évolution de la surface entre les deux dernières images. Par contre, il faut noter que l'apparition claire d'une déformation de la surface par l'action du champ électrique (image b) était prévue dans le cadre de certaines théories pour expliquer des désaccords entre les calculs et les expériences liées à l'émission de champs mais n'avait jamais été observée.

Figure 4 : Images résultant de la soustraction d'interférogrammes à 9 MV/m (a), 25 MV/m (b), 35 MV/m (c) et 35 MV/m 20 mn plus tard (d). Dans certains cas les franges restent, traduisant une petite variation d'intensité du signal tir à tir.

CONCLUSION

Ces dernières années, nous avons étendu la gamme de longueur d'onde couverte au LULI de 13.9 nm à 25.5 nm et avons travaillé sur de nouveaux schémas de pompages. Dans l'avenir, nous continuerons d'étendre la gamme de lasers X mais nous travaillerons aussi à essayer de mieux comprendre le laser à 21.2 nm de manière à le rendre plus performant et stable pour les applications. Nous allons poursuivre les applications déjà commencées. Enfin, un effort soutenu est envisagé pour amener l'optique X au niveau qui nous est nécessaire.

Remerciements

Nous tenons à remercier toutes les équipes ayant collaborées à cette étude, en particulier M. Boussoukaya, A. Zeitoun-Fakiris du SEA-DAPNIA et D. Joyeux, D. Phalippou du IOTA pour l'expérience sur le niobium. Ce travail a été partiellement soutenu par L'Europe sous le contrat TMR : ERBFMGECT950044. Les expériences ont été réalisées au LULI, Unité Mixte n° 7605 CNRS - CEA - Ecole Polytechnique - Université Pierre et Marie Curie

Références

1. Ph. Zeitoun et al, UVX'96, Annales de Physique, 22, p37 (1997)
2. B. Rus et al, Phys Rev. A, **55**,5, 1997, p 3858
3. D. Joyeux et al, ce recueil