

UVX 2012, 02004 (2013)

DOI: [10.1051/uvx/201302004](https://doi.org/10.1051/uvx/201302004)

© Owned by the authors, published by EDP Sciences, 2013

Étude de sources X multi-keV sur la LIL

L. Jacquet, V. Tassin, B. Villette et C. Reverdin

CEA, DAM, DIF, 91297 Arpajon, France

Résumé. En 2011, une campagne expérimentale dédiée à l'étude des sources X a eu lieu sur la LIL. Son objectif principal était de mesurer l'énergie X émise dans la bande K par des feuilles métalliques irradiées par le quadruplet LIL. Les matériaux utilisés étaient le titane, le fer, le cuivre, le zinc et le germanium qui permettent de couvrir la gamme d'énergie $\sim (4,7-10,5)$ keV pour les besoins radiographiques. Deux séries de tirs, à des énergies délivrées sur cible de ~ 5 kJ et ~ 10 kJ, ont été réalisées. Les premiers résultats expérimentaux, ainsi que leur comparaison avec ceux de simulations effectuées avec le code d'hydrodynamique radiative FCI2, sont présentés.

1. INTRODUCTION

En 2011, une campagne expérimentale dédiée à l'étude des sources X a eu lieu sur l'installation LIL du CEA/CESTA, son objectif principal étant de mesurer l'énergie X émise dans la bande multi-keV, par des feuilles métalliques épaisses irradiées par laser. Ce type de feuilles est couramment utilisé pour réaliser des sources X dans le domaine d'irradiation kJ/ns. Bien que ces feuilles ne soient pas les plus performantes en terme de rendement de conversion (CE), elles présentent un intérêt certain en terme de facilité de réalisation et d'implantation auprès d'une expérience. Les études passées ont mis en évidence la forte dépendance des CE obtenus, aux conditions d'irradiation laser : énergie, puissance, éclairage, durée d'impulsion, taille des taches focales, longueur d'onde de la lumière laser, angles d'incidence des faisceaux. Par ailleurs, la modélisation du comportement hydro-radiatif de ces feuilles et de la production de rayonnement X est un problème physique complexe couplant l'hydrodynamique, l'absorption de l'énergie laser, les conceptions thermique et radiative, et les processus de physique atomique HETL. Compte tenu des incertitudes encore existantes dans les codes sur ces phénomènes, des expériences dédiées restent nécessaires pour caractériser les performances que l'on peut attendre de ces sources auprès d'une installation laser donnée. À ce titre cette campagne sur la LIL s'inscrit dans la préparation et le dimensionnement des expériences de radiographie sur le LMJ, les conditions d'irradiation disponibles sur ces deux installations étant proches. De plus, l'interprétation de ces expériences de sources X, qui mettent en œuvre des plasmas métalliques chauds, sous-denses et fortement ionisés, concoure à la validation des modèles de physique atomique HETL [1, 2], en particulier les modèles simplifiés couplés aux codes d'hydrodynamique radiative. Les matériaux métalliques utilisés étaient le titane (Ti), le fer (Fe), le cuivre (Cu), le zinc (Zn), et le germanium (Ge). Avec ces matériaux, la gamme d'énergies disponibles, pour les besoins radiographiques, va de $\sim 4,7$ keV avec le Ti à $\sim 10,5$ keV avec le Ge. L'émission des métaux dans les bandes multi-keV correspond à des transitions radiatives impliquant un niveau de couche K. L'énergie est rayonnée principalement par des raies et, dans la plupart des cas, la contribution de la raie He- α est largement dominante et représente au moins 80 % de l'énergie multi-keV totale. Les sources X multi-keV utilisant les métaux de Z moyen sont utilisées dans de multiples applications intervenant dans le contexte de la fusion par confinement inertiel. Ainsi, à partir de radiographies utilisant la raie du vanadium (V) à 5,2 keV, la raie du nickel à 7,8 keV et

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License 2.0, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

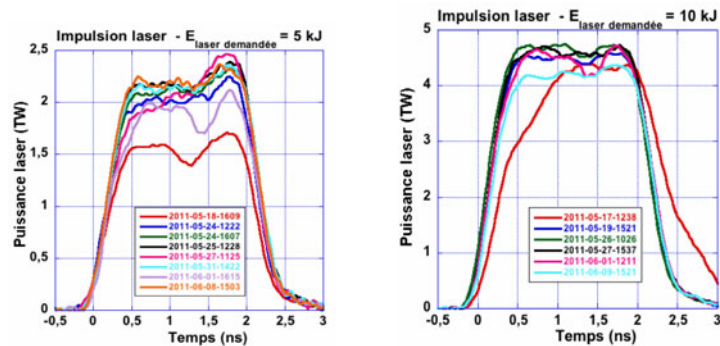


Figure 1. Lois de puissance laser mesurées pour les différents tirs. Tirs à faibles énergies (graphes de gauche), à fortes énergies (graphes de droite).

celle du Cu à 8,4 keV, la vitesse d'implosion et la masse restante d'ablateur ont été mesurées pour des capsules expérimentées, en attaque indirecte, sur OMEGA et sur le NIF [3,4]. Après avoir présenté les caractéristiques de la campagne, nous en donnons les premiers résultats, obtenus avec un spectromètre large-bande, et le début de l'interprétation à partir de simulations d'hydrodynamique radiative.

2. LA CONFIGURATION EXPÉRIMENTALE

2.1. Les cibles

Les cibles métalliques étaient constituées de feuilles épaisses (épaisseur au moins égale à $20\ \mu\text{m}$) et carrées, de 4 mm de côté. Plusieurs configurations de cibles, utilisant des métaux, peuvent être envisagées pour créer des sources X multi-keV : feuilles épaisses, feuilles minces pré-explosées [5], cavités tapissées [6,7]. La configuration en feuilles épaisses était apparue comme la plus satisfaisante par rapport aux caractéristiques de l'irradiation fournie par le quadruplet LIL : elle est bien adaptée à une irradiation unilatérale et à une forme simple du profil temporel de la puissance laser délivrée. Les feuilles minces pré-explosées permettent d'obtenir des rendements de conversion plus élevés mais l'utilisation de cette configuration de sources aurait nécessité une optimisation consistante, pour chacun des cinq matériaux, de l'épaisseur de feuille et de la loi laser, ceci conduisant à une campagne expérimentale beaucoup plus compliquée à prévoir et à mettre en œuvre.

2.2. Les caractéristiques de l'irradiation laser

Les feuilles ont été irradiées par le quadruplet LIL en incidence quasi-normale, l'angle entre la direction des faisceaux et la normale aux cibles étant de 5° et le point de focalisation des faisceaux étant situé au centre de la face avant des feuilles. Les quatre faisceaux étaient équipés de lame de phase. Deux valeurs d'énergie délivrée, 10 kJ (forte irradiation) et 5 kJ (faible irradiation) étaient prévues pour chaque matériau, ce qui devait conduire à la réalisation de dix tirs. Quatorze tirs ont été effectués au total. Certains tirs ayant été répétés ou consacrés aux réglages des diagnostics, ceci a permis de réaliser dix tirs utiles pour les objectifs scientifiques de la campagne. Les puissances laser ayant été délivrées aux cibles, sont données pour les différents tirs, sur la Figure 1. Ce sont des créneaux, de ~ 2 ns de largeur à mi-hauteur, et ayant des valeurs maximales égales à $\sim 2,5$ TW (faible irradiation) et $\sim 4,5$ TW (forte irradiation). La qualité et la répétitivité des puissances fournies par le laser est apparue moins bonne à faible irradiation. Les énergies délivrées au centre des feuilles, dans un rayon de 1 mm, ont été mesurées avec précision. Ces énergies représentent 90 % des énergies totales délivrées aux cibles, compte tenu du profil estimé de répartition de l'énergie laser dans la tache focale LIL, avec les lames de phase

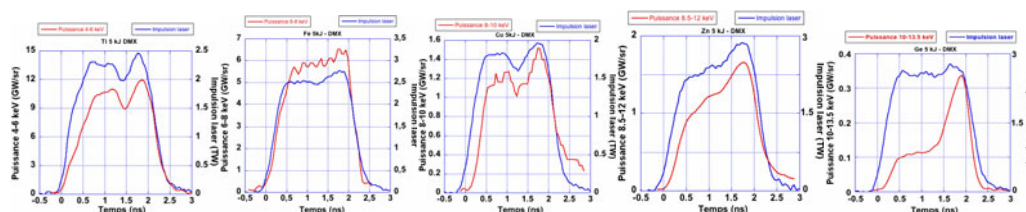


Figure 2. Puissances émises dans les bandes multi-keV du titane (4–6 keV), du fer (6–8 keV), du cuivre (8–10 keV), du zinc (8,5–12 keV), et du germanium (10–13,5 keV), pour les tirs à faible irradiation (courbes rouges). Sur les mêmes figures, sont rappelées les puissances laser délivrées (courbes bleues).

utilisées pour ces tirs. Ce profil peut être ajusté, pour les valeurs de rayon inférieures à $\sim 0,7$ mm, par une gaussienne de largeur à mi-hauteur égale à 0,4 mm. Pour les rayons supérieurs à 0,7 mm, le profil s'écarte de la gaussienne avec la présence d'« ailes » de tache qui contiennent une fraction non négligeable de l'énergie totale délivrée. Les valeurs à mi-hauteur d'éclairement sur cible étaient respectivement égales à $\sim 6 \cdot 10^{14}$ W/cm² et $\sim 1,3 \cdot 10^{15}$ W/cm² pour la faible et la forte irradiation.

2.3. Les diagnostics

De nombreux diagnostics étaient implantés sur les tirs afin d'obtenir une caractérisation très complète de ces sources X. Trois spectromètres large-bande (DMX, micro-DMX et micro-DMX SIM) [8] ont été installés pour mesurer les puissances et les énergies intégrées sur les bandes multi-keV des différents matériaux métalliques. Leurs angles de visée étaient, respectivement, 59°, 36°, 22°, par rapport à la normale aux cibles. Disposant de voies de mesure à basse énergie, DMX permet d'avoir également accès aux puissances et énergies rayonnées sur l'ensemble du spectre. Deux spectromètres à haute résolution, ont permis d'acquérir des spectres détaillés, intégrés et résolus en temps, à des angles de visée de 8° et 45° par rapport à la normale aux cibles. À ces mesures spectroscopiques étaient associées des mesures d'imagerie pour caractériser spatialement les zones émissives des sources X. Un imageur à sténopé X-durs, intégré en temps était placé à 30° de la normale aux cibles. Un deuxième imageur 2D, résolu en temps, a permis d'acquérir des images de la localisation spatiale des zones émissives à 4 instants différents (0,8 ns, 1 ns, 1,5 ns, 2 ns), à un angle de visée de 20°. Des diagnostics, propres à l'installation LIL et mesurant les énergies rétro-diffusées et les bilans d'énergie rétro-déviée ont été également utilisés. Ils ont permis de déterminer, pour chaque tir, l'énergie ayant effectivement participé à la conversion X.

3. PREMIERS RÉSULTATS DE MESURE ET INTERPRÉTATION

3.1. Les résultats de DMX

Les puissances (fonction du temps) et les énergies intégrées sur les bandes multi-keV des cinq matériaux utilisés ont été déduites des signaux mesurés par DMX. Les courbes de puissance sont présentées sur les Figures 2 et 3 pour les tirs à faibles et fortes irradiations laser. À l'exception du tir sur le Ge à faible énergie, les puissances multi-keV émises reproduisent qualitativement, avec un délai temporel, les puissances laser délivrées. De même, les valeurs d'énergie multi-keV émises sont rassemblées dans les Tableaux 1 et 2. Ces valeurs d'énergies sont données avec une incertitude de $\pm 20\%$. Dans ces tableaux, sont également données les valeurs d'énergies calculées avec le code FCI2 [9] et des conditions de simulation précisées au paragraphe suivant.

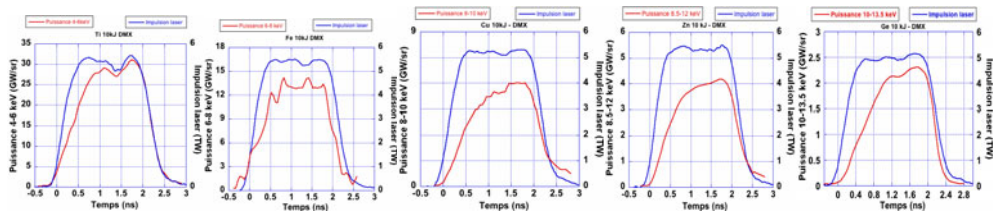


Figure 3. Puissances émises dans les bandes multi-keV du titane (4–6 keV), du fer (6–8 keV), du cuivre (8–10 keV), du zinc (8,5–12 keV), et du germanium (10–13,5 keV), pour les tirs à forte irradiation (courbes rouges). Sur les mêmes figures, sont rappelées les puissances laser délivrées (courbes bleues).

Tableau 1. Énergies multi-keV mesurées avec DMX et calculées avec FCI2 pour les tirs à faibles énergies d’irradiation.

matériaux	titane (4–6) keV	fer (6–8) keV	cuivre (8–10) keV	zinc (8,5–12) keV	germanium (10–13,5) keV
E multi-keV (J/sr) Mesures DMX	54	23,1	9,2	7,2	3,5
E multi-keV (J/sr) Simulations FCI2	22	9,4	3,7	3,8	2,2

Tableau 2. Énergies multi-keV mesurées avec DMX et calculées avec FCI2 pour les tirs à fortes énergies d’irradiation.

matériaux	titane (4–6) keV	fer (6–8) keV	cuivre (8–10) keV	zinc (8,5–12) keV	germanium (10–13,5) keV
E multi-keV (J/sr) Mesures DMX	19,3	10,1	2,4	2,5	0,33
E multi-keV (J/sr) Simulations FCI2	5,7	2,8	0,5	0,87	0,56

3.2. Premières études d’interprétation des résultats de DMX

Pour interpréter les résultats fournis par DMX, une première série de simulations avec le code FCI2 a été effectuée. Pour ces calculs, un module de transport de rayonnement multi-groupe a été utilisé, et pour la conduction thermique électronique le modèle de Spitzer avec limitation de flux, la valeur du coefficient de limitation f étant calée sur des simulations utilisant un modèle de transport non-local [10]. Pour le traitement de la physique atomique HETL, deux modèles, RADIOM [1, 11, 12] et GONRAD, ont été pris en compte. Ils diffèrent par la détermination de la température d’ionisation, le traitement des grandeurs spectrales étant par contre identique. Dans ces calculs, les caractéristiques d’irradiation des cibles, en particulier les lois de puissance laser, correspondent exactement à celles des tirs. Ces simulations mettent en évidence les effets, à la fois du traitement HETL et de la conduction thermique, sur les puissances et les énergies multi-keV calculées. La valeur de f permettant de retrouver les résultats du transport non-local est de l’ordre de 0,07 pour le titane et le fer, et de 0,05 pour le cuivre, le zinc et le germanium. Cette tendance est la même avec les deux modèles HETL utilisés. Les valeurs d’énergies multi-keV émises, obtenues avec ces valeurs de f et RADIOM, sont données dans les Tableaux 1 et 2. Il apparaît que les calculs, dans ces conditions, sont nettement sous-émissifs par rapport aux mesures (à l’exception du tir sur le Ge à faible énergie). Les valeurs maximales de puissances et les énergies, obtenues avec GONRAD, sont, dans tous les cas, supérieures à celles obtenues avec RADIOM, l’écart sur les énergies variant entre $\sim 1,3$ et $\sim 1,9$. Malgré cela, les calculs utilisant GONRAD restent également

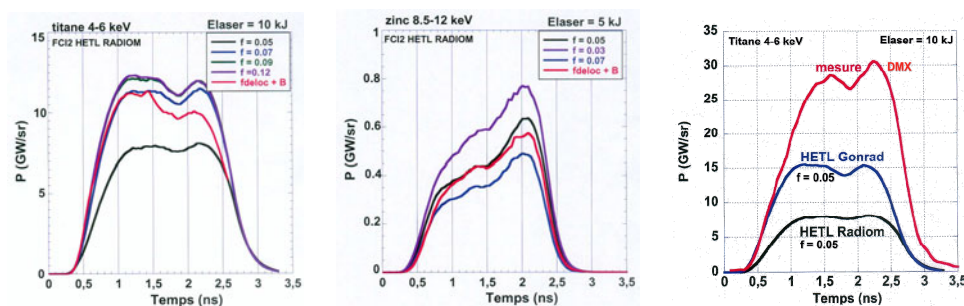


Figure 4. Exemples de puissances multi-keV en fonction du temps calculées avec FCI2. Influence du coefficient de limitation de flux f sur la puissance (graphes de gauche et du centre), influence du modèle HETL sur la puissance (graphe de droite).

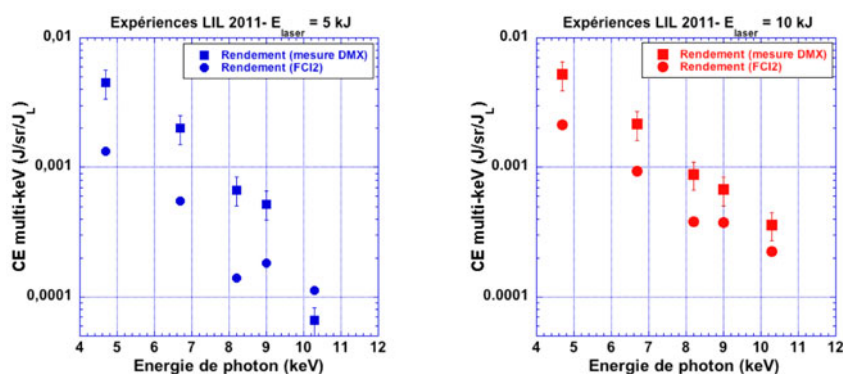


Figure 5. Rendements de conversion multi-keV mesurés et calculés pour les feuilles de Ti (4–6 keV), Fe (6–8 keV), Cu (8–10 keV), Zn (8,5–12 keV), Ge (10–13,5 keV). Tirs à ~ 5 kJ (graphe de gauche), tirs à ~ 10 kJ (graphe de droite).

sous-émissifs par rapport aux mesures. Des exemples de courbes de puissances multi-keV illustrant ces résultats sont présentés en Figure 4. Aucun des deux modèles HETL utilisés pour ces premiers calculs d'interprétation ne permet donc de restituer les résultats de mesure. Par ailleurs, la comparaison des puissances et énergies intégrées sur les bandes multi-keV n'est pas suffisante pour discriminer les modèles HETL. Il faudra aussi, ultérieurement, confronter les spectres d'émission détaillés calculés et mesurés, ces derniers étant encore en cours de dépouillement.

À partir des énergies données dans les Tableaux 1 et 2, nous avons calculé les rendements de conversion multi-keV mesurés et déduits des simulations. Ces rendements sont définies ici comme le rapport entre l'énergie délivrée dans la direction de visée (en J/sr) et l'énergie laser totale délivrée. Cette définition apparaît comme la plus pertinente dans le cas de feuilles épaisses, irradiées d'un seul côté, et pour lesquelles l'émission est anisotrope et prépondérante en face avant. Les valeurs de rendement sont tracées sur la Figure 5 pour les deux niveaux d'irradiation laser. Ces graphes mettent en évidence la baisse attendue [13, 14] des CE en fonction du Z du matériau, et la sous-émissivité des calculs par rapport aux mesures.

4. CONCLUSION

Nous avons présenté les premiers résultats expérimentaux et d'interprétation d'une campagne d'étude de sources X ayant eu lieu sur l'installation LIL. Ils concernent les impulsions de puissance et les

énergies multi-keV émises par des feuilles de titane, fer, cuivre, zinc, et germanium, irradiées à deux niveaux d'énergie et de puissance laser. Les mesures effectuées avec le spectromètre large-bande DMX ont fourni des valeurs de rendement de conversion X multi-keV dans des conditions d'irradiation très représentatives de celles du LMJ. Les puissances et les énergies mesurées ont été comparées à celles obtenues avec des simulations d'hydrodynamique radiative utilisant le code FCI2. Ces calculs mettent en évidence l'effet de la modélisation du transport électronique et de la physique atomique HETL sur les résultats, et la difficulté à restituer les résultats de mesures avec les modèles actuellement disponibles. En plus des spectromètres large-bande, de nombreux autres diagnostics ont été mis en oeuvre au cours de cette campagne, en particulier des spectromètres à haute résolution et des imageurs. La caractérisation de ces sources X va être poursuivie et approfondie avec l'analyse de l'ensemble de ces résultats.

Références

- [1] M. Busquet, Phys. Fluids **85** (1993) 4191
- [2] C. Bowen, A. Decoster *et al.*, J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transf. **81**, 71 (2003)
- [3] D. G. Hicks *et al.*, Phys. Plasmas **17**, 102703 (2010)
- [4] O. Landen *et al.*, Phys. Plasmas **18**, 051002 (2011)
- [5] D. Babonneau *et al.*, Phys. Plasmas. **15**, 092702 (2008)
- [6] F. Girard *et al.*, Phys. Plasmas **16**, 052704 (2009)
- [7] F. Girard *et al.*, Phys. Plasmas **18**, 079901 (2011)
- [8] J. L. Bourgade *et al.*, Rev. Sci. Instrum. **72**, 1173 (2001)
- [9] E. Buresi *et al.*, Laser Part. Beams **4**, 531, 1986
- [10] G. Schurtz *et al.*, Phys. Plasmas **7**, 4238 (2000)
- [11] B. Canaud *et al.*, Laser Part. Beams **22** (2004) 109
- [12] D. G. Colombant *et al.*, Phys. Plasmas **7**, 2046 (2000)
- [13] D. Babonneau *et al.*, Laser Part. Beams **9**, 527 (1991)
- [14] J. Workman and G. A. Kyrala, Rev. Sci. Instrum. **72**, 678 (2001)