

## Source X-UV pour la spectroscopie d'absorption en régime femtoseconde

L. Lecherbourg<sup>1,2</sup>, S. Fourmaux<sup>1,\*</sup>, J.C. Kieffer<sup>1</sup>, F. Martin<sup>1</sup>, H. Pépin<sup>1</sup>, M. Chaker<sup>1</sup>, S. Magnan<sup>3</sup> et C.Y. Coté<sup>3</sup>

<sup>1</sup> INRS-emt, Univ. du Québec, Varennes, J3X 1S2, Canada

<sup>2</sup> LULI, 91192 Palaiseau, France

<sup>3</sup> AXIS Photonique Inc., Varennes, J3X 1S2, Canada

**Résumé.** Les processus dynamiques se produisant lors de transitions de phase ultra-rapide peuvent être déduits à partir de mesures de diffraction ou d'absorption de rayonnement X. Les lasers femtosecondes ont récemment été utilisés pour étudier la dynamique de la matière au moyen d'une pompe optique et d'une sonde X : du rayonnement X K alpha produit par interaction laser plasma. Nous présentons nos plus récents résultats concernant le développement d'un système de spectroscopie d'absorption du rayonnement X (XAS) basée sur une source laser-plasma large bande dans la gamme 1-5 nm permettant d'atteindre une résolution temporelle femtoseconde. Le système est conçu pour sonder les dynamiques électroniques ayant lieu durant la transition de phase semiconducteur-métal du dioxyde de vanadium (VO<sub>2</sub>) lorsque celle-ci est initiée par une impulsion laser femtoseconde. Dans la présente expérience, un spectre large bande proche du seuil L du vanadium (511 eV) et du seuil K de l'oxygène (525 eV) du VO<sub>2</sub> a été généré et mesuré avec un haut rapport signal sur bruit (100), une grande résolution spectrale ( $\Delta E/E = 4.2 \times 10^{-3}$ ), et une résolution temporelle de 1,2 ps.

### 1. INTRODUCTION

Les processus dynamiques se produisant dans le domaine de la physique de la matière condensée ont récemment été étudiées sur des échelles de temps de l'ordre de la picoseconde et de la femtoseconde. Une impulsion laser femtoseconde constitue la pompe optique qui est utilisée pour initier la réaction d'intérêt dans un échantillon. L'évolution temporelle de cette réaction est ensuite mesurée, par des techniques de diffraction ou d'absorption X, par une sonde de rayonnement X issue d'une source secondaire produite par interaction laser plasma. La combinaison d'un tel faisceau sonde avec la technique de diffraction X a été utilisée pour étudier différents mécanismes tels que : les processus ultrarapides dans des films organiques chauffés par lasers [1, 2], la production cohérente de phonons dans des cristaux [3, 4], le mécanisme de fusion ultrarapide dans des semiconducteurs [5, 6, 7], et la transition de phase solide-solide femtoseconde dans le dioxyde de vanadium (VO<sub>2</sub>) [8].

La diffraction X ultrarapide permet de sonder les électrons des couches internes qui sont fortement corrélés aux positions atomiques et donne ainsi accès à des informations structurales avec une résolution temporelle ultime de quelques centaines de femtosecondes. Les techniques d'absorption X donnent accès quant à elle à la structure atomique locale et sont spécifiques à l'élément atomique étudié. Proche des seuils, la structure de spectroscopie d'absorption (NEXAFS: Near Edge Absorption Spectroscopy) donne accès aux dynamiques électroniques se produisant dans des niveaux électroniques spécifiques car cette technique permet de sonder les états de valence inoccupés à partir d'un niveau électronique interne. De plus, les techniques basées sur l'étude de la structure fine d'absorption X au delà du seuil (EXAFS: extended x-ray absorption fine structure) permettent d'accéder d'une manière simple à la structure atomique locale dans le voisinage d'un atome d'un système complexe. Les éléments clés pour le succès de telles expériences au moyen d'une source X plasma sont les suivants : i) le contrôle de la

---

\* Contact : fourmaux@emt.inrs.ca

forme spectrale de la source X, ii) l'optimisation de la gamme spectrale en fonction de l'échantillon sondé, iii) la puissance moyenne mesurée par le détecteur afin d'optimiser le rapport signal sur bruit, iv) la résolution spectrale du système de détection, et v) la résolution temporelle. Peu d'études ont été réalisées pour comprendre comment sont générés de tels rayonnements large bande ultrarapide [9, 10]. La première expérience démontrant le potentiel de l'utilisation de rayonnements produit par interaction laser-plasma pour résoudre temporellement les dynamiques de la matière sur des échelles de temps picosecondes sont basées sur le NEXAFS résolue en temps [11]. Les rayonnements X durs émis par un plasma produit par laser ont été utilisés pour observer la dissociation du SF<sub>6</sub> en phase gazeuse avec une résolution temporelle picoseconde. Dans cette expérience, le changement d'intensité d'une raie d'absorption résonnante a été mesurée en fonction du retard séparant la pompe (400 fs à 0.53 μm) de la sonde (rayonnement X de 1 ps à 2,5 keV). Plus récemment, les sources de rayonnement X produit par interaction laser-plasma ont été utilisées pour la spectroscopie d'absorption résolue en temps d'un plasma d'Al [12, 13], la photoexcitation d'un échantillon de silicium [14] et du XANES (X-ray absorption near edge spectroscopy) résolue en temps d'une solution d'ion Fe(CN)<sub>6</sub><sup>4-</sup> dans un solvant [15]. Cependant, dans ces expériences, la résolution temporelle est limitée par la durée du rayonnement X, une caméra CCD étant utilisée pour la mesure. Une méthode alternative pour améliorer la résolution temporelle est d'utiliser une caméra à balayage de fente couplée à un spectromètre. La résolution temporelle ultime obtenue avec une caméra à balayage de fente est de quelques centaines de femtoseconde en un seul tir laser et autour d'une picoseconde en mode accumulation [16, 17]. Des études de spectroscopies d'absorption de rayonnement X résolues en temps ont également été réalisées avec une source synchrotron avec une résolution temporelle picoseconde, par exemple sur du silicium liquide [18] ou sur des transitions de phase solide-solide [19].

Nous discutons dans ce texte de la faisabilité d'un système NEXAFS femtoseconde basé sur une source de rayonnement X produit par interaction laser-plasma et une caméra à balayage de fente femtoseconde. Un spectre de rayonnement X large bande est généré par interaction d'un faisceau laser de haute intensité avec une cible solide. Une synchronisation parfaite est réalisée entre la pompe optique et la sonde de rayonnement X car les faisceaux sont issus du même système laser. Nous utilisons une caméra à balayage de fente femtoseconde en mode accumulation pour obtenir simultanément un bon rapport signal sur bruit et une résolution temporelle ultra-rapide, qui sont nécessaires pour réaliser la spectroscopie d'absorption X résolue en temps. Le système modèle étudié est la transition de phase ultrarapide semiconducteur-métal du dioxyde de vanadium [8] afin de valider la faisabilité de la technique d'absorption en utilisant une source X produite par laser. L'objectif est d'observer l'évolution de la structure d'absorption proche des seuils pour obtenir des informations sur les populations de bandes électroniques spécifiques. La gamme d'énergie est 500-560 eV, proche du seuil L du vanadium et du seuil K de l'oxygène. Des expériences de référence ont été réalisées avec le rayonnement X produit par le synchrotron ALS (Advanced Light Source, Berkeley Lab) sur une échelle de temps picoseconde [19], et sur une échelle de temps femtoseconde [20] en utilisant la technique de découpage laser (slicing) qui permet d'isoler un flash de 300 fs de rayonnement X synchrotron. Nous pensons qu'il est possible de réaliser une expérience similaire mais beaucoup plus compacte et simple en utilisant une source laser très intense et une caméra à balayage de fente comme détecteur. Il faut souligner que pour comprendre la dynamique ultrarapide du VO<sub>2</sub> les résultats mesurés par absorption X sont complémentaires de ceux obtenus par spectroscopie optique ultrarapide [21] ou par diffraction X ultrarapide [8].

Dans la suite de ce texte, nous présentons les caractéristiques temporelles de la source de rayonnement X produite par laser avec notre caméra à balayage de fente PX1. Pour réaliser une expérience d'absorption de rayonnement X nous avons besoin d'une source de rayonnement X quasi continue où la forme spectrale et la brillance peuvent être contrôlées. De plus, le système de détection doit permettre de détecter un signal ayant 1 % de fluctuation. Dans ce but, nous avons construit un spectromètre de rayonnement X avec une résolution spectrale  $\Delta E/E = 4 \times 10^{-3}$  et pouvant être couplé avec une caméra CCD ou notre caméra à balayage de fente PX1. Nous présentons les calibrations et tests de ce spectromètre avec le rayonnement X émis par un plasma de carbone. Nous avons démontré

une résolution temporelle de 1,2 ps en mode accumulation avec une très grande dynamique quand le spectromètre est couplé à notre caméra à balayage de fente. Finalement, nous montrons qu'une cible de tantale donne une source de rayonnement X continu intense, ce qui est très prometteur pour réaliser une expérience d'absorption résolue en temps dans la gamme 1-5 nm.

## 2. CARACTÉRISTIQUES EXPÉRIMENTALES

Les expériences ont été réalisées avec le laser femtoseconde Ti:saphire de l'Institut National de la Recherche Scientifique (INRS). Ce système laser, très compact, est composé d'un oscillateur, d'un étireur, d'un amplificateur régénératif, et de trois étages amplification multi-passages (4, 3 et 2 passages). La compression est effectuée sous vide pour permettre d'atteindre une très forte intensité sur la cible. Le taux de répétition est de 10 Hz et les expériences présentées ont été réalisées avec 250 mJ après compression à une longueur d'onde de 800 nm. La durée d'impulsion est de 60 fs et la stabilité en énergie est de 3% rms. Le contraste (maximum de l'impulsion laser par rapport au piédestal) à la fréquence fondamentale est de  $1 \times 10^{-6}$ . Une correction du front de phase a été introduite sur le système pour maîtriser la qualité du faisceau et sa forme temporelle. Une optique adaptative (miroir déformable de 32 actuateurs) est utilisée à la sortie du compresseur pour contrôler les distorsions du front d'onde et la taille de la tache focale [22]. Le vide est maintenu à une valeur inférieure à  $10^{-6}$  Torr. Après compression, le faisceau est doublé en fréquence avec un cristal de KDP. Une efficacité de conversion de 20% est mesurée entre la lumière à 800 nm et celle à 400 nm.

Le faisceau à 400 nm (50 mJ, 60 fs) est focalisé, à l'aide d'une parabole hors axe  $f/3$ , sur une cible solide avec un angle de 68 degrés par rapport à la normale de la cible. Le diamètre de la tache focale est alors de 5 micromètres, ce qui permet d'obtenir une intensité sur cible de  $10^{18}$  W/cm<sup>2</sup>. La cible est déplacée entre deux tirs de façon à toujours disposer d'une surface vierge pour l'interaction laser-matière à chaque tir. Il est crucial d'éliminer les débris produit par la cible lors de l'interaction laser plasma car ils peuvent endommager les optiques du système ou bien se déposer sur celles-ci. Dans cet objectif, des films plastiques mobiles sont utilisés devant les optiques pour éliminer ces dommages qui dégradent l'émission de rayonnement X.

Plusieurs cibles ont été utilisées, une cible de carbone pour la calibration spectrale, et des cibles de molybdène, d'argent, de lanthane et de tantale pour obtenir un spectre continu. Le rayonnement X produit par le plasma de carbone est enregistré par une diode p-i-n placée dans l'enceinte sous vide. Le rayonnement X produit à l'aide de cible d'éléments lourds est enregistré au moyen d'un PMT placé en dehors de l'enceinte sous vide et derrière une fenêtre de beryllium épaisse de 50 micromètres.

Un spectromètre en réflexion dont l'élément centrale est un réseau concave à champ plan (Hitashi 001-0450, 2400 traits/mm) est utilisé pour mesurer la distribution en énergie de l'émission X produite par le plasma. Une caméra CCD ou bien la caméra à balayage peuvent facilement être utilisés de manière interchangeable à la sortie du spectromètre. Le spectromètre couvre la gamme 1-5 nm. La distance entre la source et le réseau est 237 mm, et celle entre le réseau et le plan spectral est 235 mm. L'angle d'incidence du rayonnement X sur le réseau est 1,3 degré. La résolution en énergie du réseau est en principe  $\Delta E/E = 4.3 \times 10^{-4}$  [23] mais comme nous allons le voir, elle est limitée par notre système de détection.

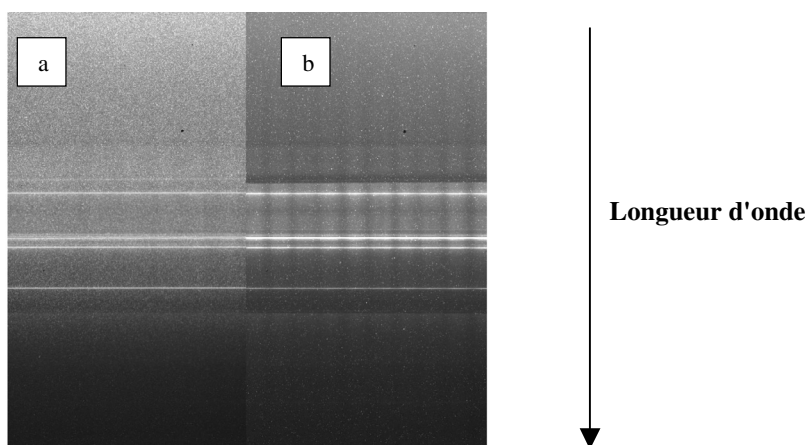
Le système de détection est placé à 45 degré de la normale à la surface de la source X. Le spectromètre est entièrement blindé pour éviter tout bruit provenant du rayonnement directe produit par le plasma. Un filtre d'aluminium de 102,7 nm d'épaisseur, déposé sur une feuille de 113 nm de polyimide, est utilisé pour empêcher la lumière visible de pénétrer dans le spectromètre. Ce filtre est protégé par une feuille de 117,3 nm de polyimide. Des aimants sont aussi utilisés devant l'entrée du spectromètre pour dévier les électrons provenant du plasma. Le spectromètre est totalement motorisé ce qui autorise un réglage fin du positionnement du réseau quand l'enceinte expérimentale est sous vide. La caméra CCD, utilisée pour des mesures intégrées en temps, est le modèle PI-MTE 1300B à haute

sensibilité de Princeton Instruments. Elle permet d'enregistrer en une seule mesure la gamme spectrale complète de 1 à 5 nm. Cette caméra peut facilement être remplacée, après l'alignement du réseau, par la caméra à balayage de fente PX1. Une photocathode de KBr a été choisie pour optimiser l'efficacité quantique autour de 500 eV. Le signal obtenu sur le phosphore à la sortie de la caméra à balayage de fente est amplifié grâce à un MCP Photeck par un facteur 2000. Le signal est ensuite enregistré par une caméra CCD Photometrics série 200. La caméra à balayage de fente est utilisée en mode accumulation synchronisée avec l'impulsion laser à l'aide d'un système de commutateur optique [17].

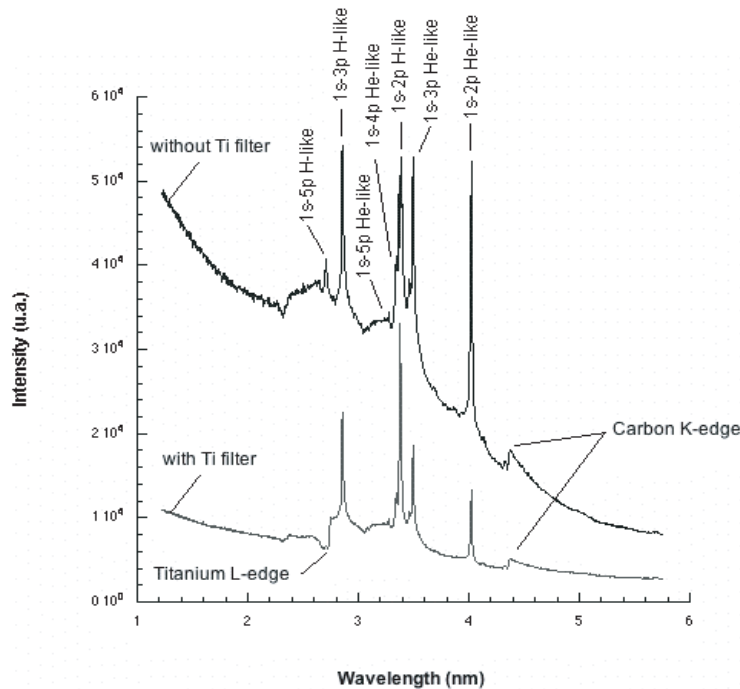
### 3. RÉSULTATS

La calibration du spectromètre est effectuée à l'aide des raies d'émission d'un plasma de carbone et des seuils d'absorption de filtres de titane (Ti) et de polyimide placés entre la source plasma et l'entrée du spectromètre. La figure 1 montre un spectre de raies du carbone intégré dans le temps, et mesurée avec la caméra CCD sans (figure 1a) et avec (figure 1b) un filtre de 160 nm de titane protégé par un filtre de 118,2 nm de polyimide. Les séries hydrogèneoïde et héliumoïde des raies d'émission du carbone sont identifiées sur la figure. Notre résultat est très similaire à celui obtenu par Fujikawa *et al.* [24] avec le même réseau et une source de rayonnement X produite par laser, mais présentant une durée d'impulsion piconseconde. Nous avons aussi observé les différents seuils correspondant aux éléments atomiques composant les filtres (seuil K du carbone pour le filtre de polyimide et seuil L pour le filtre de titane). La grille rectangulaire (traits foncés) visible sur les deux figures provient du réseau et est attribuée à un défaut de fabrication.

Des coupes obtenues à partir des graphiques de la figure 1 sont présentées dans la figure 2. La courbe du haut correspond à la mesure sans filtre de titane et celle du bas correspond au spectre obtenu avec devant le spectromètre le filtre additionnel de 160 nm de titane et 118,2 nm de polyimide. L'atténuation d'intensité observée dans la figure 2, résultant de la présence des filtres, correspond à la transmittance des deux filtres (titane et polyimide). Donc, ces données indiquent que la lumière diffusée traversant le filtre d'aluminium est limitée. Une estimation de la résolution spectrale expérimentale peut être déduite de la largeur à mi-hauteur d'une raie d'émission du carbone. Nous avons mesuré, en utilisant la largeur de la raie hydrogèneoïde à 4 nm, une résolution expérimentale  $\Delta E/E = 4.2 \times 10^{-3}$ .



**Figure 1.** Spectre intégré en temps émis par un plasma de carbone. a) spectre obtenu avec un filtre composé de 102,7 nm d'Al déposé sur 114 nm de polyimide, plus une protection d'un filtre de 117,3 nm de polyimide. b) spectre obtenu avec un filtre supplémentaire composé de 160 nm de titane et 118,2 nm de polyimide. 1500 tirs lasers ont été accumulés pour chaque mesure.

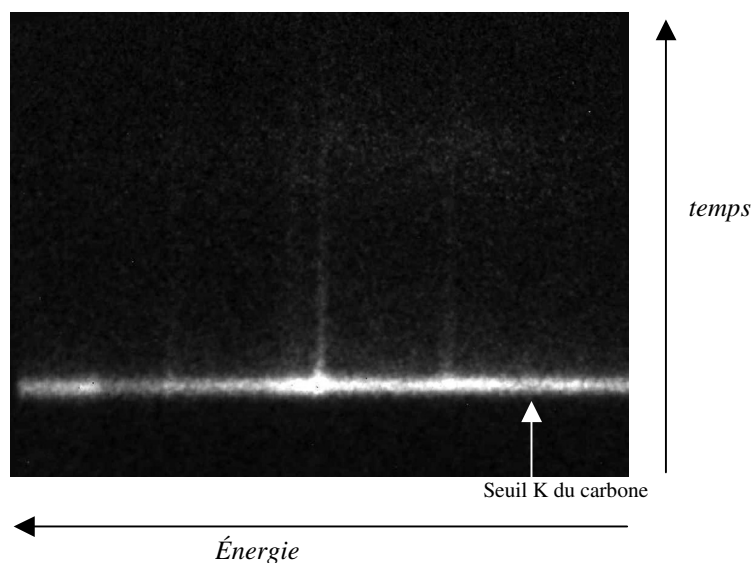


**Figure 2.** Spectre d'émission du carbone intégré dans le temps provenant de la figure 1. La courbe du haut (fig. 1a) est mesurée avec un filtre composé de 102,7 nm d'Al déposé sur 114 nm de polyimide, plus une protection d'un filtre de 117,3 nm de polyimide. La courbe du bas (fig. 1b) est mesurée avec un filtre supplémentaire composé de 160 nm de titane et 118,2 nm de polyimide.

Le spectre d'émission obtenu avec la caméra à balayage de fente PX1 couplé au spectromètre est présenté dans la figure 3. L'évolution des raies hydrogémoïde et héliumoïde est observée durant quelques dizaines de picosecondes.

D'autre part, l'émission du continuum moins intense dure seulement environ 6 ps. Le balayage utilisé ici donne une dispersion temporelle de 126 fs/pixel de l'image. Le taux de montée (10%-90%) du spectre de rayonnement X est d'environ 9 pixels, ce qui nous donne une résolution temporelle autour de 1,2 ps en mode accumulation. L'évolution temporelle des raies d'émission du carbone mesurées dans notre expérience est très similaire de celle obtenue par Andiel *et al.* [25]. La résolution spectrale expérimentale déduite à partir de la largeur à mi-hauteur de la raie d'émission héliumoïde à 4 nm est inférieure à celles des spectres intégrés en temps ( $\Delta E/E = 9 \times 10^{-3}$ ). Cependant, le seuil K du carbone du au filtre de polyimide est clairement observé sur la figure.

Dans notre gamme d'intérêt pour la réalisation d'une expérience d'absorption ultra-rapide avec un échantillon de VO<sub>2</sub> (500-560 eV), une source de rayonnement X constituée par un plasma de tantale (Ta) est le plus prometteur en terme de brillance (figure 4). La figure 4a présente un spectre intégré en temps d'un plasma de tantale obtenu avec une caméra CCD avec (courbe du bas) et sans (courbe du haut) filtre de 160 nm de Ti et 118,2 nm de polyimide. Nous pouvons clairement observer les seuils dus aux filtres de polyimide et de titane. L'évolution temporelle de l'émission de rayonnement X d'un plasma de tantale mesuré avec la caméra à balayage de fente PX1 est présenté sur la figure 4b. Le seuil du carbone due au filtre de polyimide est clairement observé. La brillance de la source de tantale est d'un ordre de grandeur plus grande que celle de la source de carbone et donc le nombre de tir



**Figure 3.** Spectre d'émission du carbone résolu en temps mesuré à l'aide de la caméra à balayage de fente PX1, corrigé de la courbure de la caméra. 3000 tirs lasers sont accumulés pour obtenir cette mesure. Le seuil K du carbone, dû au filtre de polyimide, est clairement visible.

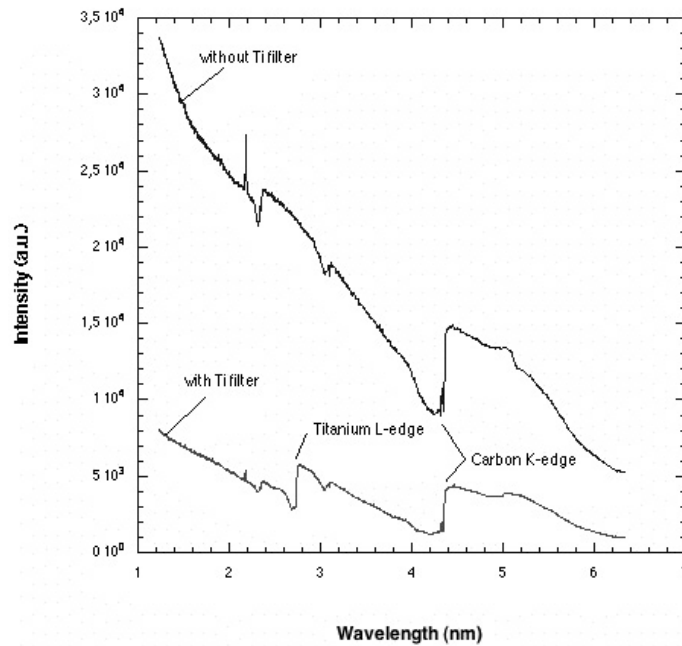
accumulé pour obtenir cette image a été fortement diminué comparé aux résultats présentés dans la figure 3.

Le bruit de photon peut être estimé à partir du nombre de coups mesurés il est de l'ordre de 1,2%. Il peut être facilement amélioré en augmentant le nombre de tirs accumulés, démontrant que ce n'est pas une limitation et ouvrant la voie pour des études NEXAFS résolues en temps dans du VO<sub>2</sub> où un rapport signal sur bruit de 1% est nécessaire pour suivre l'évolution de la transition de phase [26].

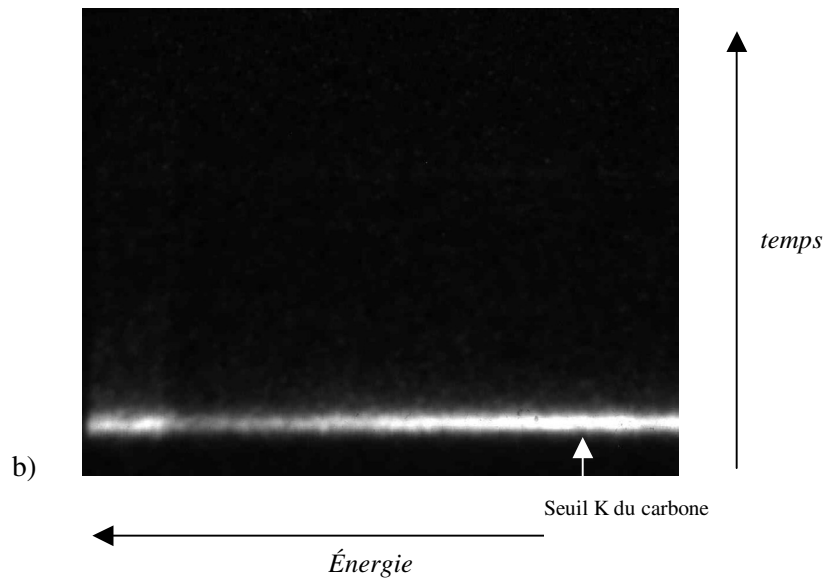
Afin de souligner le potentiel des sources X plasma pour des études NEXAFS, nous nous sommes attachés sur le seuil K du carbone des filtres de polyimide. La figure 5 présente le rapport d'un spectre d'émission du tantale divisé par un spectre d'émission du tantale ayant un filtre supplémentaire de titane/polyimide autour de 300 eV. Ce résultat peut être comparé avec le spectre NEXAFS du seuil K du carbone du polyimide obtenue par Voght *et al.* [27]. Plusieurs structures au-dessus du bruit de photon peuvent être identifiées sur notre spectre. Ce résultat préliminaire peut encore être amélioré et est très encourageant.

#### 4. CONCLUSION

Pour conclure, un système NEXAFS basé sur un laser a été calibré pour sonder les dynamiques électroniques dans la transition de phase semiconducteur-métal du VO<sub>2</sub>, excitée par une impulsion laser femtoseconde. Dans la présente expérience, des spectres larges bandes proche du seuil L du vanadium et du seuil K de l'oxygène du VO<sub>2</sub> (500 eV) ont été générés et mesurés avec simultanément un haut rapport signal sur bruit (100), une haute résolution spectrale ( $\Delta E/E = 4 \times 10^{-3}$ ) et une résolution temporelle de 1,2 ps. Une importante puissance moyenne de rayonnement X peut être produite et des expériences NEXAFS femtoseconde peuvent maintenant être mises en œuvre pour sonder un échantillon dans une géométrie pompe-sonde.

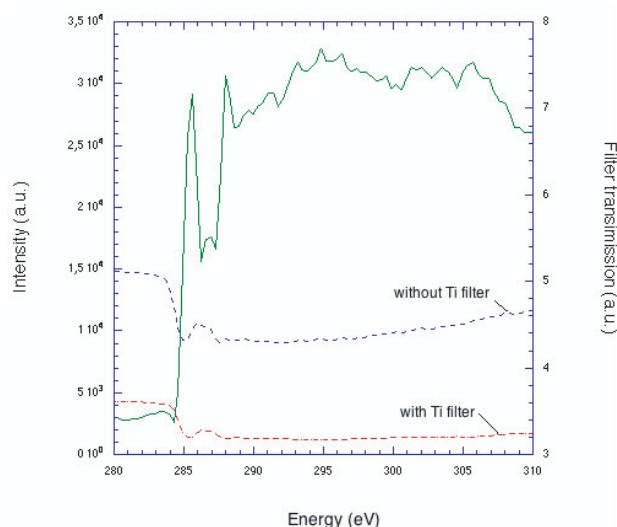


a)



b)

**Figure 4.** Spectre d'émission de rayonnement X du tantale, corrigé de la courbure de la caméra à balayage de fente. a) Spectre intégré temporellement mesuré avec la caméra CCD. La courbe du haut est avec un filtre d'aluminium/polyimide seulement. Celle du bas est avec un filtre d'aluminium/polyimide et un filtre additionnel de titane/polyimide. 240 tirs lasers ont été accumulés pour chaque mesure. b) Spectre résolu en temps mesuré avec la caméra à balayage de fente PX1. 150 tirs lasers ont été accumulés pour obtenir cette image. Le seuil K du carbone du au filtre d'aluminium/polyimide est clairement visible.



**Figure 5.** Rapport entre l'émission de rayonnement X du tantale divisé par l'émission de rayonnement X du tantale avec un filtre supplémentaire de titane/polyimide autour du seuil K du carbone à 300 eV. Les courbes en pointillées présentent l'émission du tantale provenant de la figure 4a). La courbe du haut est sans filtre supplémentaire, alors que celle du bas est avec un filtre supplémentaire de titane/polyimide.

## Remerciements

Les auteurs souhaitent remercier S. Payeur, F. Poitras et C. Sirois pour leur support technique. Ce travail est financé par le NSERC, le réseau des centres d'excellences du Canada CIPI, le programme des chaires de recherche du Canada et par le Ministère de l'éducation du Québec.

## Références

- [1] C. Rischel, A. Rousse, I. Uschmann, P. Albouy, J. P. Geindre, P. Audebert, J. P. Gauthier, E. Forster, J. Martin, and A. Antonetti, *Femtosecond time-resolved X-ray diffraction from laser-heated organic films*, *Nature* **390**, 490-492 (1997)
- [2] A. Rousse, C. Rischel, and J. C. Gauthier, *Colloquium: Femtosecond x-ray crystallography*, *Reviews of Modern Physics* **73**, 17 (2001)
- [3] C. Rose-Petruck, R. Jimenez, T. Guo, A. Cavalleri, C. W. Siders, F. Rksi, J. A. Squier, B. C. Walker, K. R. Wilson, and C. P. J. Barty, *Picosecond-millingström lattice dynamics measured by ultrafast X-ray diffraction*, *Nature* **398**, 310-312 (1999)
- [4] K. Sokolowski-Tinten, C. Blome, J. Blums, A. Cavalleri, C. Dietrich, A. Tarasevitch, I. Uschmann, E. Forster, M. Kammler, M. Horn-von-Hoegen, and D. von der Linde, *Femtosecond X-ray measurement of coherent lattice vibrations near the Lindemann stability limit*, *Nature* **422**, 287-289 (2003)
- [5] C. W. Siders, A. Cavalleri, K. Sokolowski-Tinten, Cs. Tóth, T. Guo, M. Kammler, M. Horn von Hoegen, K. R. Wilson, D. von der Linde, and C. P. J. Barty, *Detection of Nonthermal Melting by Ultrafast X-ray Diffraction*, *Science* **286**, 1340-1342 (1999)
- [6] K. Sokolowski-Tinten, C. Blome, C. Dietrich, A. Tarasevitch, M. Horn von Hoegen, D. von der Linde, A. Cavalleri, J. Squier, and M. Kammler, *Femtosecond X-Ray Measurement of Ultrafast Melting and Large Acoustic Transients*, *Physical Review Letters* **87**, 225701 (2001)



- [7] A. Rousse, C. Rischel, S. Fourmaux, I. Uschmann, S. Sebban, G. Grillon, Ph. Balcou, E. Förster, J. P. Geindre, P. Audebert, J. C. Gauthier, and D. Hulin, *Non-thermal melting in semiconductors measured at femtosecond resolution*, Nature **410**, 65-68 (2001)
- [8] A. Cavalleri, Cs. Tóth, C. W. Siders, J. A. Squier, F. Ráksi, P. Forget, and J. C. Kieffer, *Femtosecond Structural Dynamics in VO<sub>2</sub> during an Ultrafast Solid-Solid Phase Transition*, Physical Review Letter **87**, 237401 (2001)
- [9] P. Forget, F. Dorchies, J. C. Kieffer, and O. Peyrusse, *Ultrafast broadband laser plasma x-ray source for femtosecond time-resolved EXAFS*, Chemical Physics **299**, 259 (2003)
- [10] F. Shan, J. D. Carter, V. Ng, and T. Guo, *Laser-driven hard-x-ray generation based on ultrafast selected energy x-ray absorption spectroscopy measurements of Ni compounds*, Physical Review **E 71**, 025401 (2005)
- [11] F. Ráksi, K. R. Wilson, Z. Jiang, A. Ikhlef, C. Y. Côté, and J. C. Kieffer, *Ultrafast x-ray absorption probing of a chemical reaction*, Journal of Chemical Physics **104**, 6066 (1996)
- [12] J. Workman, M. Nantel, A. Maksimchuk, and D. Umstadter, *Application of a picosecond soft x-ray source to time-resolved plasma dynamics*, Applied Physics Letters **70**, 312 (1997)
- [13] P. Audebert, P. Renaudin, S. Bastiani-Ceccotti, J.-P. Geindre, C. Chenais-Popovics, S. Tzortzakis, V. Nagels-Silvert, R. Shepherd, I. Matsushima, S. Gary, F. Girard, O. Peyrusse, and J.-C. Gauthier, *Picosecond Time-Resolved X-Ray Absorption Spectroscopy of Ultrafast Aluminum Plasmas*, Physical Review Letters **94**, 025004 (2005)
- [14] H. Nakano, Y. Goto, P. Lu, T. Nishikawa, and N. Uesugi, *Time-resolved soft x-ray absorption spectroscopy of silicon using femtosecond laser plasma x rays*, Applied Physics Letters **75**, 2350 (1999)
- [15] T. Lee, Y. Jiang, C. G. Rose-Petruck, and F. Benesch, *Ultrafast tabletop laser-pump-x-ray probe measurement of solvated Fe(CN)<sub>6</sub><sup>4-</sup>*, Journal of Chemical Physics **122**, 084506 (2005)
- [16] P. Gallant, P. Forget, F. Dorchies, Z. Jiang, J. C. Kieffer, P. A. Jaanimagi, J. C. Rebuffie, C. Goulmy, J. F. Pelletier, and M. Sutton, *Characterization of a subpicosecond x-ray streak camera for ultrashort laser-produced plasmas experiments*, Review of Scientific Instruments **71**, 3627 (2000)
- [17] C. Belzile, J. C. Kieffer, C. Y. Cote, T. Oksenhendler, and D. Kaplan, *Jitter-free subpicosecond streak cameras*, Review of Scientific Instruments **73**, 1617 (2002)
- [18] S. L. Johnson, P. A. Heimann, A. M. Lindenberg, H. O. Jeschke, M. E. Garcia, Z. Chang, R. W. Lee, J. J. Rehr, and R. W. Falcone, *Properties of Liquid Silicon Observed by Time-Resolved X-Ray Absorption Spectroscopy*, Physical Review Letter **91**, 157403 (2003)
- [19] A. Cavalleri, H. H. W. Chong, S. Fourmaux, T. E. Glover, P. A. Heimann, J. C. Kieffer, B. S. Mun, H. A. Padmore, and R. W. Schoenlein, *Picosecond soft x-ray absorption measurement of the photoinduced insulator-to-metal transition in VO<sub>2</sub>*, Physical Review **B 69**, 153106 (2004)
- [20] A. Cavalleri, M. Rini, H. H. W. Chong, S. Fourmaux, T. E. Glover, P. A. Heimann, J. C. Kieffer, and R. W. Schoenlein, *Band-selective Measurement of Electronic Dynamics in VO<sub>2</sub> using Femtosecond Near Edge X-ray Absorption*, Physical Review Letter, To be published
- [21] M. F. Becker, A. B. Buckman, R. M. Walser, T. Lépine, P. Georges, and A. Brun, *Femtosecond laser excitation of the semiconductor-metal phase transition in VO<sub>2</sub>*, Applied Physics Letters **65**, 1507 (1994)
- [22] A. V. Kudryashov, V. B. Kulakov, Y. V. Kotsuba, L. V. Novikova, V. Y. Panchenko, and V. V. Samarkin, *Low-cost adaptive optical devices for multipurpose applications*, SPIE Vol. **3688**, 469 (1999)
- [23] N. Nakano, H. Kuroda, T. Kita, and T. Harada, *Development of a flat-field grazing-incidence XUV spectrometer and its application in picosecond XUV spectroscopy*, Applied optics **14**, 2386-2392 (1984)

- [24] C. Fujikawa, N. Yamaguchi, T. Hara, T. Kawachi, H. Oyama, K. Ando, and Y. Aoyagi, *In situ calibration of a flat-field grazing incidence spectrograph with an x-ray charge-coupled device camera using a transmission grating and a laser-produced plasma for x-ray laser research*, Review of Scientific Instruments **69**, 2849 (1998)
- [25] U. Andiel, K. Eidmann, and K. Witte, *Time-resolved x-ray K-shell spectra from high density plasmas generated by ultrashort laser pulses*, Physical Review **E 63**, 026407 (2001)
- [26] M. Abbate, F. M. F. de Groot, J. C. Fuggle, Y. J. Ma, C. T. Chen, F. Sette, A. Fujimori, Y. Ueda, and K. Kosuge, *Soft-x-ray-absorption studies of the electronic-structure changes through the VO<sub>2</sub> phase transition*, Physical Review **B 43**, 7263 (1991)
- [27] U. Vogt, T. Wilhein, H. Stiel, H. Legall, *High resolution x-ray absorption spectroscopy using a laser plasma radiation source*, Review of Scientific Instruments **75**, 4606 (2004)