

# Spectroscopie XANES résolue en temps avec une source laser-plasma « de table » : étude du cuivre porté sous conditions extrêmes et hors équilibre

N. Jourdain<sup>1,2</sup> L. Lecherbourg<sup>1</sup> F. Dorchie<sup>2</sup> V. Recoules<sup>1</sup> P. Renaudin<sup>1</sup>

<sup>1</sup> CEA DAM, DIF, F-91297 Arpajon, France.

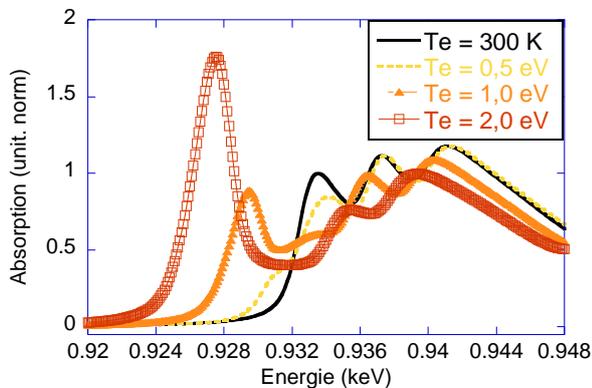
<sup>2</sup> CELIA, Université de Bordeaux, Talence, France.

## La matière « dense et tiède » hors équilibre

Le développement des sources laser ultra-brèves permet de nos jours de porter la matière dans des conditions extrêmes de densité ( $\sim$  solide) et de température ( $\sim 10\,000$  K) désignées par le régime de matière dense et tiède.

Les modèles de physique des plasmas et de la matière condensée ne permettent pas de décrire correctement le comportement de la matière dans ce régime intermédiaire. De nombreuses recherches, expérimentales et théoriques, sont aujourd'hui orientées vers ce sujet.

De plus, le fait de travailler avec des lasers femtosecondes induit des situations hors-équilibre où une énergie importante est déposée dans les électrons alors que les atomes restent froids. La dynamique de l'équilibration thermique et celle des transitions de phase induites sont des questions ouvertes. Pour les métaux nobles (or, argent, cuivre), un retard à la fusion est prédit par des simulations de dynamique moléculaire quantique du fait d'un renforcement de la stabilité du réseau cristallin, appelé aussi « bond-hardening » [1]. Il est intimement lié à un décalage de la bande électronique  $d$  vers les basses énergies. Ce mécanisme a été invoqué pour interpréter une expérience de diffraction électronique sur un échantillon d'or [2], mais son existence reste à démontrer.



**Fig. 1** : Spectres XANES calculés près du flanc  $L3$  du cuivre dans des situations hors équilibre à la densité solide : réseau froid et différentes températures électroniques.

## Mesures de spectroscopie XANES résolues en temps sur le cuivre

Un des moyens d'étudier ce phénomène expérimentalement est la spectroscopie XANES. Une étude a été récemment publiée près du flanc  $L3$  du cuivre (932 eV) par une équipe du LBNL de Berkeley sur un synchrotron [3]. Les états électroniques  $d$  sont sondés à partir du niveau  $2p^{3/2}$ . Un pré-seuil est observé avant le flanc, et son évolution permet de suivre la dynamique de la température électronique.

Le décalage de la bande  $d$  en situation hors-équilibre doit se traduire par un décalage spectral de ce pré-seuil (voir Fig. 1), mais il n'a pas encore été observé. D'autre part, nous pensons que la perte de l'ordre cristallin doit se traduire par une disparition des structures post-flanc.

Plusieurs séries d'expériences ont été réalisées avec le laser Eclipse du laboratoire CELIA et une station expérimentale « de table » dédiée aux mesures XANES résolues en temps [4]. Dans un premier temps, des spectres XANES ont été obtenus avec une source X produite en irradiant une cible solide de CsI. La résolution temporelle était limitée par la durée relativement longue de la source  $\sim 15$  ps FWHM ( $\sim$  temps attendu pour l'équilibration thermique du cuivre). Plus récemment, un jet d'agrégats de Xénon a été utilisé pour produire une source X d'émissivité comparable, mais avec une durée significativement plus courte ( $\leq 2.5$  ps FWHM). Des spectres XANES hors équilibre ont été enregistrés et montrent une évolution du pré-seuil similaire aux mesures publiées au LBNL. Le rapport signal/bruit permet de résoudre l'évolution des structures post-flanc et de déduire la dynamique de la perte d'ordre cristallin.

Pour observer un décalage spectral du pré-seuil, et valider (ou non) le « bond-hardening », une résolution temporelle plus courte est nécessaire, et devrait être prochainement atteinte avec la source X bêtatron au LOA.

## Références

- [1] E. Bévilion *et al.* *Phys. Rev. B* **85**, 115117 (2014).
- [2] R. Ernstorfer *et al.* *Science* **323**, 5917 (2009).
- [3] B. I. Cho *et al.* *Phys. Rev. Lett.* **106**, 167601 (2011).
- [4] F. Dorchie *et al.* *Rev. Sci. Inst.* **86**, 073106 (2015).