

Transformations des matériaux sous choc

Thibaut DE RESSEGUIER, André DRAGON

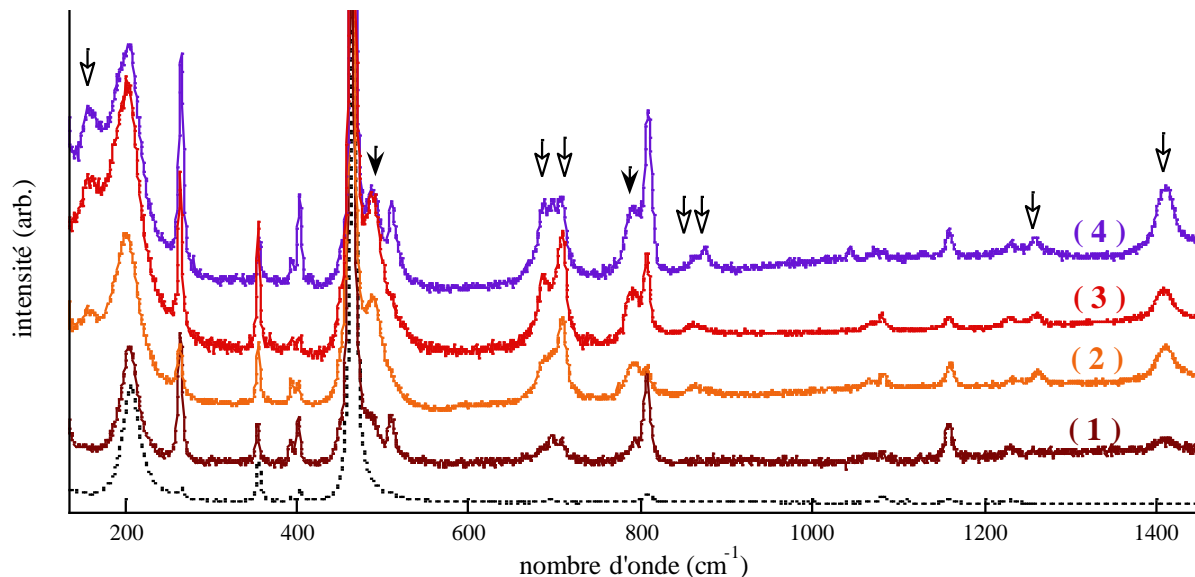
Contacts : resseguier@ensma.fr ; andre.dragon@ensma.fr

Partenariats : CEA (Bruyères-le-Châtel, Valduc, Le Ripault), LULI (Ecole Polytechnique), IMPMC (Paris), LPMTM (Villetaneuse), IPGP (Paris), PIMM (ENSAM-ParisTech)

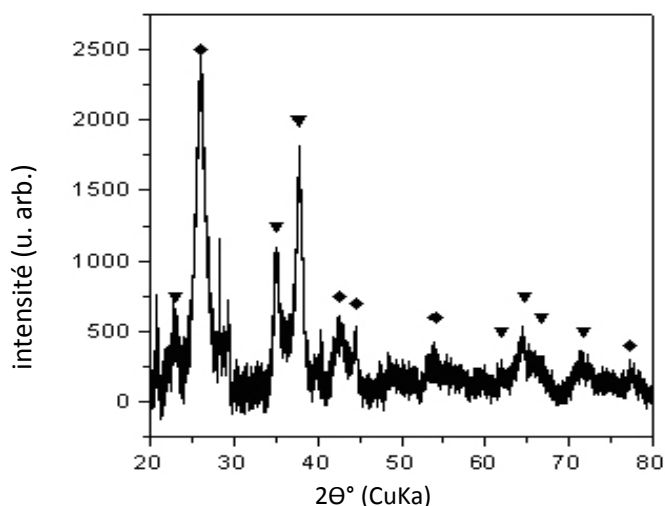
Programmes : ANR **BCNO** (Programme Blanc 2005), ANR **SECHEL** (Simulating the Earth Core with High Energy Lasers, Programme Blanc 2007)

Sous l'effet des sauts de pression et de température qui accompagnent un chargement par choc, certains matériaux subissent des transformations structurales, réversibles ou non (fusion, transitions de phase solide-solide, amorphisation...). L'étude de ces transformations comporte de nombreuses applications, par exemple en **géophysique** (pour l'étude des impacts météoritiques), en **planétologie** (où des questions essentielles restent ouvertes sur l'état de la matière dans les conditions thermodynamiques qui règnent au cœur des planètes), ou en **science pour l'ingénieur** (pour la synthèse de nouveaux matériaux sous forme de phases ultra-dures, d'intérêt industriel). Les chocs présentent un double intérêt : ils permettent (i) d'appliquer relativement facilement des pressions très élevées (jusqu'à la dizaine de Mégabars !) sur des surfaces relativement grandes, et (ii) d'acquérir des informations sur la cinétique des transformations.

Ainsi, nous étudions les **transitions de phase sous choc** dans plusieurs matériaux (fer, quartz, étain, poudres à base d'éléments légers...). Des mesures résolues en temps couplées à des simulations fournissent le chargement appliqué, puis des analyses post-choc par microscopie et/ou spectroscopie (Raman, diffraction X) permettent de caractériser la structure résiduelle du matériau et les transformations irréversibles induites par le choc. On étudie également les effets éventuels de ces transformations sur la propagation des ondes de pression, sur la résistance en traction [voir fiche "écaillage, micro-écaillage"], ainsi que les influences des principaux paramètres expérimentaux (pression de choc, temps d'application, température initiale). Les résultats expérimentaux servent de base au développement de modèles décrivant la **cinétique** des transformations observées. Depuis peu, nous travaillons avec des partenaires à l'adaptation de techniques de **spectroscopie in situ**, pour sonder l'état de la matière pendant le passage du choc et non plus seulement après retour aux conditions ambiantes.



Comparaison entre le spectre Raman de référence du quartz (traits pointillés) et les spectres mesurés sur des échantillons ayant subi des chocs générés par différentes techniques : **(1)** choc laser direct de durée ~ 3 ns ; **(2)** choc ~ 6 ns produit par deux irradiations laser successives ; **(3)** choc de ~ 140 ns produit par l'impact d'une feuille d'aluminium accélérée par laser ; **(4)** chocs laser symétriques. Les flèches indiquent l'apparition de nouveaux pics associés à l'amorphisation (flèches pleines) ou à la présence d'une nouvelle phase cristalline (flèches vides) dont la proportion augmente avec le temps de maintien de la pression.



Spectre de diffraction X réalisé sur un échantillon de graphite BC_3 turbostratique ayant subi un choc laser d'amplitude ~ 8 GPa et de durée ~ 7 ns ; Les pics repérés par des losanges et des triangles indiquent la présence de graphite amorphe et de carbure de bore, respectivement.

Thèses soutenues :

- 1999 Catherine Mabire : Transformation polymorphique et fusion de l'étain sous choc dans la gamme 0-100 GPa ; étude expérimentale et modélisation
- 2003 Patrick Berterretche : Etude des transitions de phase et du comportement mécanique du quartz sous choc laser
- 2012 Didier Loison : Etude expérimentale et numérique du micro-écaillage de cibles métalliques soumises à des chocs laser
- 2014 Charles Saint-Amans : Etude du comportement sous choc d'un matériau énergétique par spectroscopie Raman *in situ*

Quelques publications :

- *Interaction of two laser shocks inside iron samples*, T. de Rességuier, M. Hallouin, J. Appl. Phys. **90** (9), pp. 4377-4384, 2001
- *Structural transformations in laser shock-loaded quartz*, T. de Rességuier, P. Berterretche, M. Hallouin, J.P. Petit, J. Appl. Phys. **94** (3), pp. 2123-2129, 2003
- *Shock-induced irreversible transition from α -quartz to $CaCl_2$ -like silica*, P. Berterretche, T. de Rességuier, M. Hallouin, J.P. Petit, J. Appl. Phys. **96** (8), pp. 4233-4239, 2004
- *Magnetite-like nanocrystals formed by laser-driven shocks in siderite*, A. Isambert, T. de Rességuier, A. Gloter, B. Reynard, F. Guyot, J.P. Valet, Earth and Planetary Science Letters **243** (3-4), pp. 820-827, 2006
- *Effects of the α - ε phase transition on wave propagation and spallation in laser shock-loaded iron*, T. de Rességuier, M. Hallouin, Phys. Rev. B **77** (17), 174107, 2008
- *Transformations of graphite-like B-C phases under dynamic laser-driven pressure loading*, T. de Rességuier, V. Solozhenko, J.P. Petit, O.O Kurakevych, E. Lescoute, Phys. Rev. B **79** (14), 144105, 2009
- *Simulating Earth Core using High Energy Lasers*, M. Koenig, A. Benuzzi-Mounaix, E. Brambrink, N. Amadou, A. Rivasio, H.G. Wei, T. Vinci, S. Mazevet, F. Occelli, G. Morard, F. Guyot, T. de Rességuier, E. Lescoute, High Energy Density Physics **6** (2), pp. 210-214, 2010
- *Structural changes and phase stability of graphitelike BC_3 under explosive shock-wave loading*, T. de Rességuier, O.O Kurakevych, J.P. Petit, A. Chabot, V. Solozhenko, J. Appl. Phys. **108** (8), 083522, 2010
- *High power laser shock-induced dynamic fragmentation of iron foils*, G. Morard, T. de Rességuier, T. Vinci, A. Benuzzi-Mounaix, E. Lescoute, E. Brambrink, M. Koenig, H.G. Wei, A. Diziere, F. Occelli, G. Fiquet, F. Guyot, Phys. Rev. B **82** (17), 174102, 2010
- *Direct laser-driven ramp compression studies of iron: a first step toward the reproduction of planetary core conditions*, N. Amadou, E. Brambrink, A. Benuzzi-Mounaix, G. Huser, F. Guyot, S. Mazevet, G. Morard, T. de Rességuier, T. Vinci, K. Myanishi, N. Ozaki, R. Kodama, T. Boehly, O. Henry, D. Raffestin, M. Koenig, High Energy Density Physics **9** (2), pp. 243-246, 2013
- *Laser driven compression to investigate shock-induced melting of metals*, T. de Rességuier, D. Loison, A. Dragon, E. Lescoute, Metals **4**(4), 490-502, 2014
- *In-situ Raman spectroscopy and high-speed photography of a shocked triaminotrinitrobenzene-based explosive*, C. Saint-Amans, P. Hébert, M. Doucet, T. de Rességuier, J. Appl. Phys. **117** (2), 023102, 2015