

## Transformations des matériaux sous choc

Thibaut DE RESSEGUIER, André DRAGON, avec Nourou AMADOU (Univ. de Niamey, Niger)

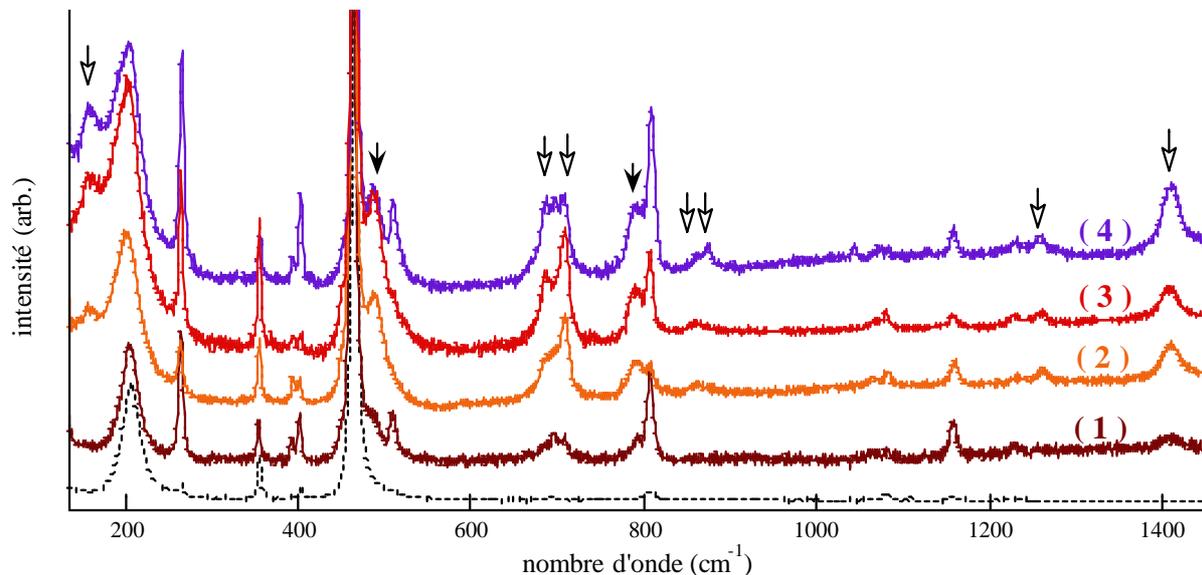
Contacts : [resseguier@ensma.fr](mailto:resseguier@ensma.fr) ; [andre.dragon@ensma.fr](mailto:andre.dragon@ensma.fr)

**Partenariats** : CEA (Gramat, Arpajon, Le Ripault), LULI (Ecole Polytechnique), IMPMC (Paris), LPMTM (Villetaneuse), IPGP (Paris), PIMM (ENSAM-ParisTech), Université de Niamey (Niger)

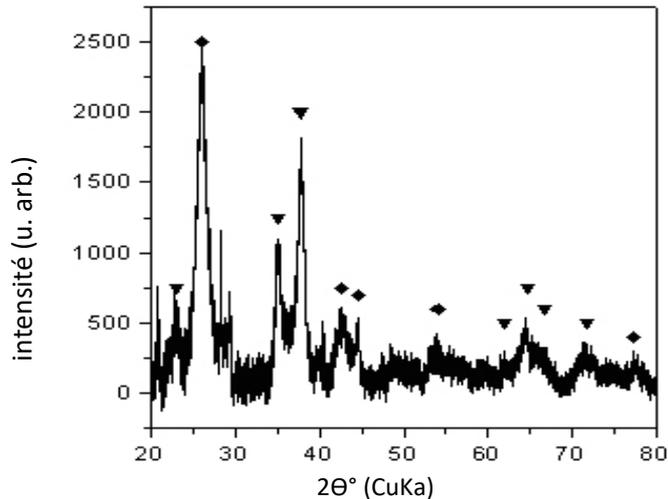
**Programmes** : ANR BCNO (Programme Blanc 2005), ANR SECHÉL (Simulating the Earth Core with High Energy Lasers, Programme Blanc 2007)

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 polymorphiques 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 la mise en œuvre 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.

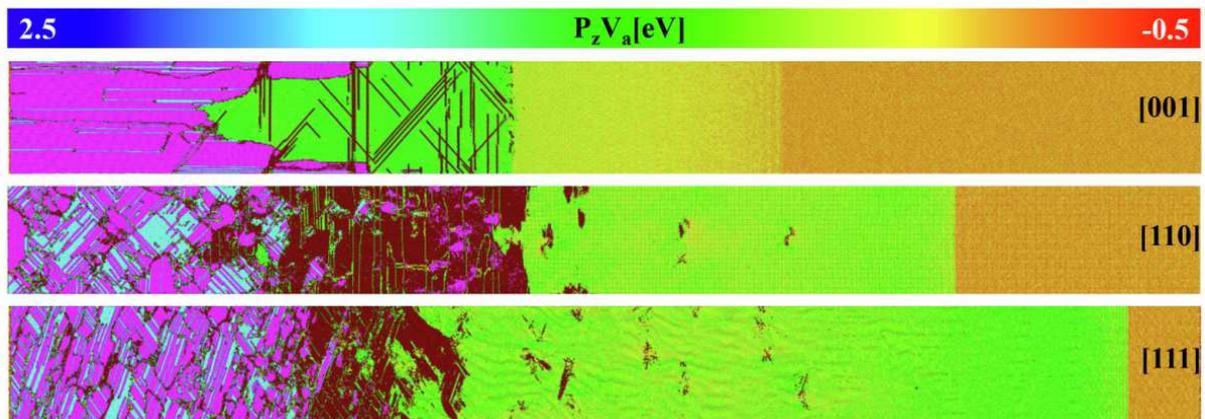


Comparaison entre le spectre Raman de référence du quartz (traits pointillés) et les spectres mesurés sur des échantillons ayant subi des chocs générés par différentes techniques : (1) choc laser direct de durée ~ 3 ns ; (2) choc ~ 6 ns produit par deux irradiations laser successives ; (3) choc de ~ 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  $\sim 8$  GPa et de durée  $\sim 7$  ns ; Les pics repérés par des losanges et des triangles indiquent la présence de graphite amorphe et de carbure de bore, respectivement.

Enfin, depuis 2017, nous effectuons en collaboration avec Nourou Amadou, de l'Université de Niamey (Niger), des calculs de **Dynamique Moléculaire** pour étudier en détail, à l'échelle atomique, les **couplages** très riches entre la **plasticité** (maclage et/ou dislocations) et les **transitions de phase** (bcc – hcp – fcc) dans le fer, mono- ou poly-cristallin, comprimé par choc ou par rampe.



Simulations en Dynamique Moléculaire (avec le potentiel d'Ackland modifié) de la réponse d'un monocristal de fer comportant des défauts (micro-vides) à une compression par rampe appliquée suivant trois orientations cristallines. Un volume initial d'environ  $30 \times 30 \times 400$  nm (soit à peu près 28 millions d'atomes) est comprimé par la gauche, par un "piston" accélérant de 0 à 800 m/s en 30 ps. La figure montre la structure atomique après 40 ps, pour les trois orientations. Des macles apparaissent en rouge sombre, la couleur rose est associée à la phase hcp, le bleu clair à la phase fcc, les autres couleurs correspondant à la pression dans la phase initiale bcc.

#### 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 Ressaiguier, M. Hallouin, J. Appl. Phys. **90** (9), pp. 4377-4384, 2001
- *Structural transformations in laser shock-loaded quartz*, T. de Ressaiguier, P. Berterretche, M. Hallouin, J.P. Petit, J. Appl. Phys. **94** (3), pp. 2123-2129, 2003
- *Shock-induced irreversible transition from  $\alpha$ -quartz to  $\text{CaCl}_2$ -like silica*, P. Berterretche, T. de Ressaiguier, 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 Ressaiguier, A. Gloter, B. Reynard, F. Guyot, J.P. Valet, Earth and Planetary Science Letters **243** (3-4), pp. 820-827, 2006
- *Effects of the  $\alpha$ - $\epsilon$  phase transition on wave propagation and spallation in laser shock-loaded iron*, T. de Ressaiguier, M. Hallouin, Phys. Rev. B **77** (17), 174107, 2008
- *Transformations of graphite-like B-C phases under dynamic laser-driven pressure loading*, T. de Ressaiguier, 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. Ravasio, H.G. Wei, T. Vinci, S. Mazevet, F. Occelli, G. Morard, F. Guyot, T. de Ressaiguier, E. Lescoute, High Energy Density Physics **6** (2), pp. 210-214, 2010
- *Structural changes and phase stability of graphitelike  $\text{BC}_3$  under explosive shock-wave loading*, T. de Ressaiguier, 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 Ressaiguier, 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 Ressaiguier, 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 Ressaiguier, 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 Ressaiguier, J. Appl. Phys. **117** (2), 023102, 2015
- *Kinetics of the iron  $\alpha$ - $\epsilon$  phase transition at high strain rates: Experiment and model*, N. Amadou, T. de Ressaiguier, E. Brambrink, T. Vinci, A. Benuzzi-Mounaix, G. Huser, G. Morard, F. Guyot, K. Myanishi, N. Ozaki, R. Kodama, M. Koenig, Phys. Rev. B **93** (21), 214108, 2016
- *Laser driven ramp compression to investigate and model dynamic response of iron at high strain rates*, N. Amadou, E. Brambrink, T. de Ressaiguier, A. Ousmane Manga, A. Aboubacar, B. Börm, A. Molineri, Metals **6** (12), 320-330, 2016
- *Coupling between plasticity and phase transition in shock and ramp-compressed single crystal iron*, N. Amadou, T. de Ressaiguier, A. Dragon, E. Brambrink, Phys. Rev. B **98** (2), 024104, 2018
- *Effects of orientation, lattice defects and temperature on plasticity and phase transition in ramp-compressed single crystal iron*, N. Amadou, T. de Ressaiguier, A. Dragon, E. Brambrink, Computational Materials Science **172**, 109318, 2020
- *Influence of point defects and grain boundaries on plasticity and phase transition in uniaxially compressed iron*, N. Amadou, T. de Ressaiguier, A. Dragon, Computational Condensed Matter **27**, e00560, 2021