

Ecaillage, micro-écaillage

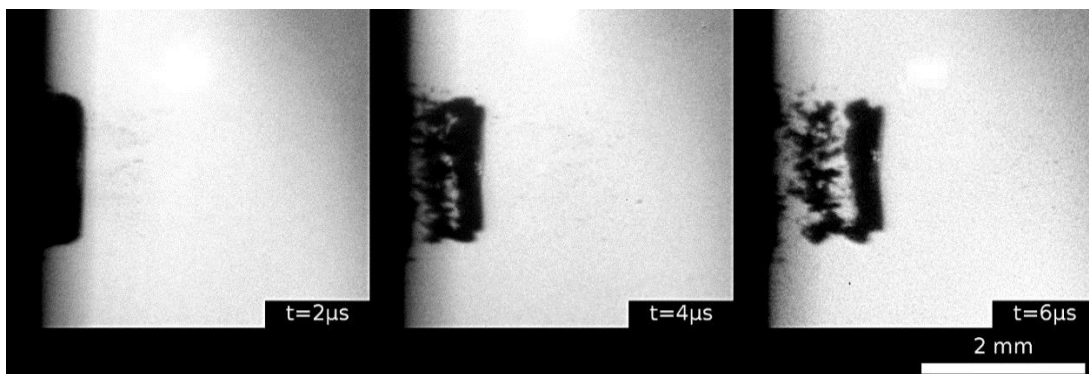
Thibaut DE RESSEGUIER, Michel BOUSTIE, André DRAGON, Loïc SIGNOR

Contacts : resseguier@ensma.fr ; michel.boustie@ensma.fr ; andre.dragon@ensma.fr ; loic.signor@ensma.fr

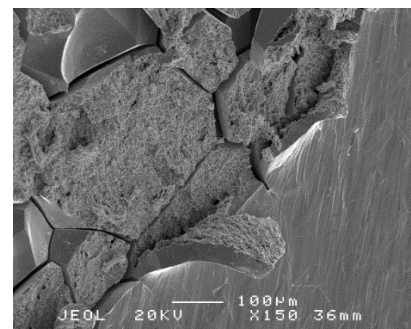
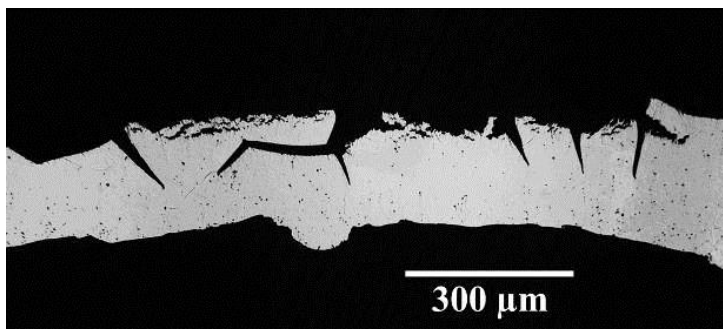
Partenariats : CEA (CESTA, Valduc, Gramat, Bruyères-le-Châtel), PIMM (ENSAM-ParisTech), ENSTA (Brest), IPR (Rennes), LULI (Ecole Polytechnique)

Dans un échantillon soumis à un choc, l'interaction d'ondes de détente lors de la réflexion de l'impulsion de compression sur la surface libre opposée à la surface chargée induit des contraintes de traction qui peuvent provoquer un endommagement caractéristique appelé **écaillage** (parce qu'il peut se traduire par l'éjection d'un ou plusieurs fragments appelés écailles). Depuis de nombreuses années, nous étudions ce phénomène dans les conditions originales de chargement par choc laser ou par impact de feuilles propulsées par laser, dans divers matériaux ductiles ou fragiles. Nous avons notamment mis en évidence

- ✓ l'influence de la microstructure (depuis les matériaux nanostructurés jusqu'aux monocristaux) sur la rupture dynamique ;
- ✓ l'effet de la température initiale de cibles métalliques (entre -240 °C et 800 °C) sur leur endommagement par écaillage ;
- ✓ l'augmentation de la résistance à l'écaillage dans des régimes "ultra-dynamiques", accessibles sous choc laser sub-picoseconde ;
- ✓ l'apport des simulations de dynamique moléculaire pour caractériser la nucléation et la croissance de pores qui constituent les premiers stades de l'écaillage dans les métaux ductiles ;
- ✓ le rôle des détentes latérales issues des bords de la surface choquée dans l'endommagement dynamique de cibles métalliques ;
- ✓ l'effet de la transformation α - ϵ du fer sur l'écaillage de ce métal (résistance dynamique et faciès de rupture).

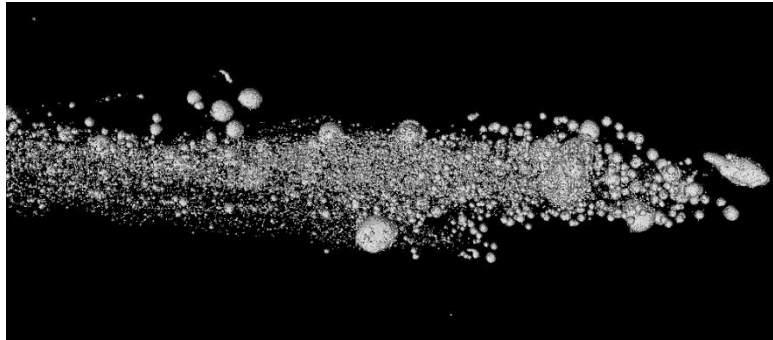


Optical shadowgraphs recorded behind a 300 μm -thick Au sample subjected to a laser shock (applied onto the left surface, not shown), showing the ejection of a spalled layer followed by secondary fragments.



Spall crater in a 260 μm -thick tin sample recovered after a laser shock applied onto the bottom surface, showing a combination of trans- and intragranular fracture leading to the ejection of a $\sim 40 \mu\text{m}$ -thick layer.

Lorsque l'amplitude du choc appliqué sur l'échantillon est suffisante pour produire la fusion du matériau (au passage du choc ou de la détente), les contraintes de traction générées lors de la réflexion sur la surface libre sont induites dans un milieu liquide. Au lieu du phénomène d'écaillage décrit précédemment, on observe alors l'éjection d'un nuage de gouttelettes, selon un processus appelé **micro-écaillage**. Sur ce sujet original, nous avons mené des campagnes de choc laser sur plusieurs métaux (étain, aluminium, fer...) combinant mesures de vitesses résolues en temps et récupération des éjectas suivie d'analyses post-choc. Les résultats servent de base à des travaux de modélisation, qui permettent de décrire l'évolution du métal, de la fusion, partielle ou totale, à la cavitation suivie de l'éjection de fragments liquides.



X-ray micro-tomography of tin droplets ejected from a laser-shock-melted sample and recovered in a low density gel collector (penetration from left to right). Such data allow 3D reconstruction of fragment size distributions that can be compared to model predictions, to try to assess ballistic properties of these ejecta.

Thèses soutenues :

- 1991 Michel Boustie : Etude de l'endommagement dynamique sous l'action d'une onde de choc induite par une impulsion laser de forte puissance dans une cible solide
- 1993 Thibaut de Ressaiguier : Etude expérimentale et numérique du comportement de matériaux de type verre soumis à des ondes de choc
- 1996 Laurent Tollier : Caractérisation de chocs laser à éclaircissements modérés par interférométrie Doppler VISAR ; application à l'étude de l'endommagement par écaillage de matériaux métalliques
- 2003 Gilles Roy : Vers une modélisation approfondie de l'endommagement ductile dynamique ; investigation expérimentale d'une nuance de Tantale et développements théoriques
- 2008 Loïc Signor : Contribution à la caractérisation et à la modélisation du micro-écaillage de l'étain fondu sous choc
- 2010 Jean-Paul Cuq-Lelandais : Etude du comportement dynamique de matériaux sous choc laser sub-picoseconde
- 2010 Emilien Lescoute : Etude de la fragmentation dynamique de métaux sous choc laser
- 2012 Didier Loison : Etude expérimentale et numérique du micro-écaillage de cibles métalliques soumises à des chocs laser

Quelques publications :

- *Spallation studies in aluminum targets using shock waves induced by laser irradiation at various pulse durations*, F. Cottet, M. Boustie, J. Appl. Phys. **66** (9), 4067, 1989
- *Experimental and numerical study on laser driven spallation into aluminum and copper targets*, M. Boustie, F. Cottet, J. Appl. Phys. **69** (11), 7533, 1991
- *Experimental and numerical study of laser induced spallation in glass*, T. de Ressaiguier, F. Cottet, J. Appl. Phys. **77**, pp. 3756-3761, 1995
- *Some applications of laser induced shocks on the dynamic behavior of materials*, M. Boustie, T. de Ressaiguier, M. Hallouin, A. Migault, J.P. Romain, D. Zagouri, Laser and Particle Beams, **14** (2), pp. 225-235, 1996
- *Spallation of polycarbonate under laser induced shocks*, T. de Ressaiguier, M. Deleignies, Shock Waves **7** (6), pp. 319-324, 1997

- *Spallation of metals subjected to intense laser shocks*, T. de Ressaiguier, S. Couturier, J. David, G. Niérat, J. Appl. Phys. **82** (5), pp. 2617-2623, 1997
- *Influence of quartz anisotropy on shock propagation and spall damage*, T. de Ressaiguier, P. Berterretche, M. Hallouin, Int. J. of Impact Engineering **31** (5), pp. 545-557, 2005
- *Use of laser-accelerated foils for impact study of dynamic material behaviour*, T. de Ressaiguier, H. He, P. Berterretche, Int. J. of Impact Engineering **31** (8), pp. 945-956, 2005
- *Time-resolved dynamic tensile spall of pure aluminium under laser irradiation*, Y. Wang, H. He, L. Wang, F. Jing, M. Boustie, T. Sekine, J. Appl. Phys. **100**, 033511, 2006
- *Measurement of dynamic tensile strength of nanocrystalline copper by laser irradiation*, Y. Wang, H. He, M. Boustie, T. Sekine, J. Appl. Phys. **101**, 103528, 2007
- *Experimental investigation of liquid spall in laser shock-loaded tin*, T. de Ressaiguier, L. Signor, A. Dragon, M. Boustie, G. Roy, F. Llorca, J. Appl. Phys. **101** (1), 013506, 2007
- *Spallation in laser shock-loaded tin below and just above melting on release*, T. de Ressaiguier, L. Signor, A. Dragon, P. Severin, M. Boustie, J. Appl. Phys. **102** (7), 073535, 2007
- *Study of damage phenomena induced by 2D effects into materials under laser driven shocks*, M. Boustie, J.P. Cuq-Lelandais, C. Bolis, L. Berthe, S. Barradas, M. Arrigoni, T. de Ressaiguier, M. Jeandin, J. Phys. D: Applied Physics **40**, pp. 7103-7108, 2007
- *On the dynamic fragmentation of laser shock-melted tin*, T. de Ressaiguier, L. Signor, A. Dragon, M. Boustie, L. Berthe, Appl. Phys. Lett. **92** (13), 131910, 2008
- *Effects of the α - ϵ phase transition on wave propagation and spallation in laser shock-loaded iron*, T. de Ressaiguier, M. Hallouin, Phys. Rev. B **77** (17), 174107, 2008
- *Dynamic fragmentation of melted metals upon intense shock wave loading. Some modelling issues applied to a tin target*, L. Signor, A. Dragon, G. Roy, T. de Ressaiguier, F. Llorca, Archives of Mechanics **60** (4), pp. 323-343, 2008
- *Spallation generated by femtosecond laser driven shocks in thin metallic targets*, J.P. Cuq-Lelandais, M. Boustie, L. Berthe, T. de Ressaiguier, P. Combis, J.P. Colombier, M. Nivard, A. Claverie, J. Phys. D: Applied Physics **42**, 065402, 2009
- *Soft recovery technique to investigate dynamic fragmentation of laser shock-loaded metals*, E. Lescoute, T. de Ressaiguier, J.M. Chevalier, M. Boustie, J.P. Cuq-Lelandais, L. Berthe, Appl. Phys. Lett. **95**, 211905, 2009
- *Dynamic Fragmentation of Laser Shock-Melted Tin: Experiment and Modelling*, T. de Ressaiguier, L. Signor, A. Dragon, G. Roy, Int. J. Fracture **163**, pp. 109-119, 2010
- *Investigation of fragments size resulting from dynamic fragmentation in melted state of laser shock-loaded tin*, L. Signor, T. de Ressaiguier, A. Dragon, G. Roy, A. Fanget, M. Faessel, Int. J. of Impact Engineering **37** (8), pp. 887-900, 2010
- *Ejection of spalled layers from laser shock-loaded metals*, E. Lescoute, T. de Ressaiguier, J.M. Chevalier, D. Loison, J.P. Cuq-Lelandais, M. Boustie, P.H. Maire, J. Breil, G. Schurtz, J. Appl. Phys. **108** (9), 093510, 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 and F. Guyot, Phys. Rev. B **82** (17), 174102, 2010
- *Experimental and numerical study of dynamic fragmentation in laser shock-loaded gold and aluminium targets*, E. Lescoute, T. de Ressaiguier, J.M. Chevalier, J. Breil, P.H. Maire, G. Schurtz, Computers, Materials and Continua **22** (3), pp. 219-238, 2011
- *Effects of cryogenic temperature on dynamic fragmentation of laser shock-loaded metal foils*, T. de Ressaiguier, E. Lescoute, D. Loison, J.M. Chevalier, F. Ducasse, J. Appl. Phys. **110** (12), 123504, 2011
- *Skew Photonic Doppler Velocimetry to investigate the expansion of a cloud of droplets created by micro-spalling of laser shock-melted metal foils*, D. Loison, T. de Ressaiguier, A. Dragon, P. Mercier, J. Bénier, G. Deloison, E. Lescoute, A. Sollier, J. Appl. Phys. **112** (11), 113520, 2012
- *Influence of elevated temperature on stress wave propagation and spallation in laser shock-loaded iron*, T. de Ressaiguier, E. Lescoute, D. Loison, Phys. Rev. B **86** (21), 214102, 2012
- *Laser driven compression to investigate shock-induced melting of metals*, T. de Ressaiguier, D. Loison, A. Dragon, E. Lescoute, Metals **4** (4), pp. 490-502, 2014