

## Ecaillage, micro-écaillage

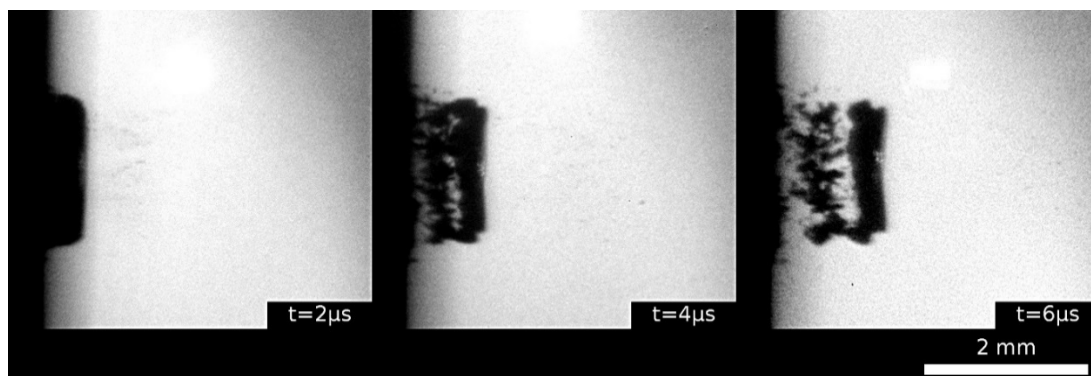
Thibaut DE RESSEGUIER, Michel BOUSTIE, André DRAGON, Loïc SIGNOR

Contacts : [resseguier@ensma.fr](mailto:resseguier@ensma.fr) ; [michel.boustie@ensma.fr](mailto:michel.boustie@ensma.fr) ; [andre.dragon@ensma.fr](mailto:andre.dragon@ensma.fr) ; [loic.signor@ensma.fr](mailto:loic.signor@ensma.fr)

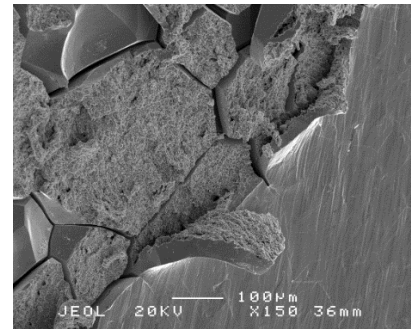
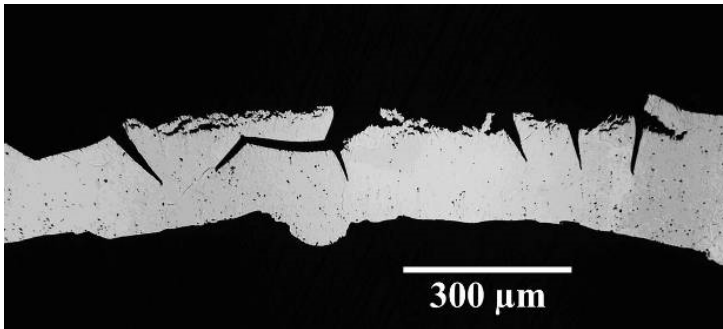
Partenariats : CEA (CESTA, Gramat, Arpajon), PIMM (ENSAM-ParisTech), ENSTA (Brest), IPR (Rennes), LULI (Ecole Polytechnique), DGA

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

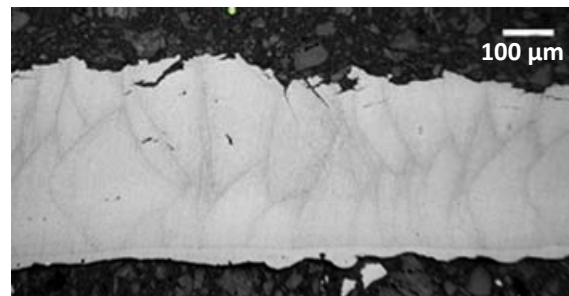
- ✓ l'influence de la microstructure (depuis les matériaux nanostructurés jusqu'aux monocristaux) sur la rupture dynamique ;
- ✓ l'effet de la température initiale de cibles métalliques (entre -240 °C et 800 °C) sur leur endommagement par écaillage ;
- ✓ l'augmentation de la résistance à l'écaillage 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  $\alpha$ - $\epsilon$  du fer sur l'écaillage de ce métal (résistance dynamique et faciès de rupture) ;
- ✓ le couplage entre le maillage (pré-choc ou produit par le choc) et l'écaillage dans le magnésium monocristallin ;
- ✓ les effets de la fabrication additive et des méso-structures spécifiques qui en résultent sur l'écaillage d'alliages métalliques produits par fusion sur lit de poudre.



Visualisation transverse ultra-rapide (temps de pose 5 ns) de l'éjection d'une écaille principale (suivie de fragments secondaires) depuis la surface libre d'une cible d'or de 300 µm soumise à un choc laser appliqué sur sa surface gauche.

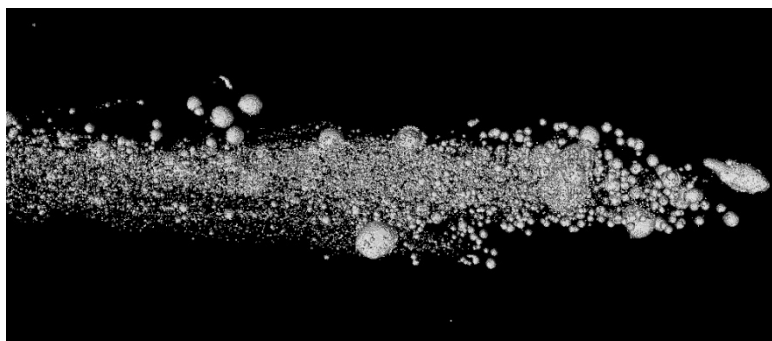


Cratère résultant de l'arrachement d'une écaille d'environ 40  $\mu\text{m}$  d'épaisseur dans une cible d'étain de 260  $\mu\text{m}$  après un choc laser appliqué sur sa surface inférieure. Le faciès de rupture montre une combinaison typique de fractures inter- et intragranulaires.



Cratères d'écaillage (en haut) dans des échantillons d'alliage d'aluminium AlSi10Mg issus de la fabrication additive et soumis à des chocs laser sur leur surface inférieure. La fusion sur lit de poudre produit des mésostructures caractéristiques ("melt pool") dont les contours, qui apparaissent en gris plus foncé, constituent des sites favorables pour l'amorçage et la propagation des fractures. Ainsi, le faciès est très dépendant de la direction d'application du choc, parallèle (à gauche) ou perpendiculaire (à droite) à la direction de fabrication.

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.



Micro-tomographie de gouttelettes d'étain éjectées depuis une cible soumise à un choc laser intense, selon le processus de micro-écaillage, collectées dans un gel de basse densité (pénétration de gauche à droite). Ce type d'observations permet une reconstruction 3D de la population de fragments et une mesure de leur distribution en tailles, qui sont ensuite confrontées aux prédictions de modèles.

## 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 éclairissements 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  $\alpha$ - $\varepsilon$  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
- *Shock response of magnesium single crystals at normal and elevated temperatures*, G.I. Kanel, G.V. Garkushin, A.S. Savinykh, S.V. Razorenov, T. de Ressaiguier, W.G. Proud, M.R. Tyutin, J. Appl. Phys. **116** (14), 143504, 2014
- *Spall fracture and twinning in laser shock-loaded single-crystal magnesium*, T. de Ressaiguier, S. Hemery, E. Lescoute, P. Villechaise, G.I. Kanel, S.V. Razorenov, J. Appl. Phys. **121** (16), 165104, 2017
- *Effects of additive manufacturing on the dynamic response of AlSi10Mg to laser shock loading*, M. Laurençon, T. de Ressaiguier, D. Loison, J. Baillargeat, J.N. Domfang-Ngnekou, Y. Nadot, Mat. Science and Engineering A **748**, pp. 407-417, 2019