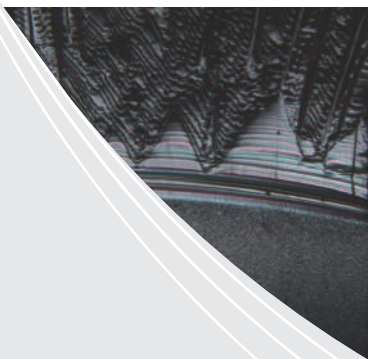
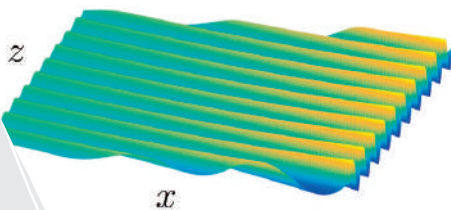
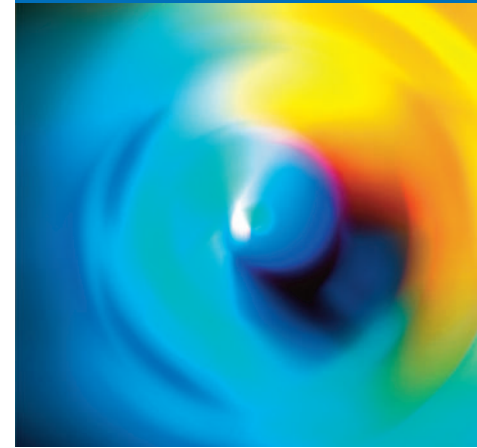




INSTITUT DE FRANCE
Académie des sciences



Plasticité, rupture et nano-matériaux : interactions entre physique et mécanique

mardi 25 février 2020 de 14h30 à 16h45
Grande salle des séances
de l'Institut de France
23, quai de Conti, 75006 Paris

La mécanique et la physique des solides déformables ont longtemps suivi des chemins quasi-parallèles, ne se rencontrant que rarement. Depuis une vingtaine d'années la situation a changé, au grand bénéfice des deux disciplines. Des collaborations très fructueuses ont été établies et les échanges de points de vue qui en ont résulté ont changé la donne dans certains domaines. On peut ainsi citer entre autres la mécanique de la rupture (étude de la propagation des fissures) et la science des matériaux. Dans le premier domaine, longtemps l'apanage exclusif de la mécanique, les raisonnements et les méthodes des physiciens ont profondément renouvelé l'approche de certaines questions comme celles de la ténacité effective de milieux hétérogènes ou de la rugosité des surfaces de rupture ; le rôle des mécaniciens étant d'apporter la puissance et la rigueur des méthodes mathématiques mises au point au fil des années pour traiter les problèmes d'élasticité impliqués. Dans le second domaine, on peut citer entre autres le développement par les mécaniciens de « modèles du second gradient » (faisant intervenir le gradient des déformations locales) permettant de décrire de manière quantitative des effets connus des physiciens des matériaux, comme l'écrouissage à différentes échelles, ou le développement par les physiciens de simulations atomistiques ou à l'échelle des dislocations, permettant de prédire des effets familiers aux mécaniciens des milieux continus, comme l'écoulement plastique.

Les conférenciers sollicités sont des spécialistes reconnus de ces questions. Le but de la conférence-débat est de susciter des échanges fructueux entre disciplines et membres des différentes sections de l'Académie.

Les organisateurs de la conférence-débat



Jean-Baptiste LEBLOND

Mécanicien des solides, Sorbonne Université, Académie des sciences

Jean-Baptiste Leblond est professeur de classe exceptionnelle à la Faculté des Sciences de Sorbonne Université (anciennement Université Pierre et Marie Curie). Il a été membre senior de l'Institut Universitaire de France de 2007 à 2017 et est membre de la Section des Sciences Mécaniques et Informatiques de l'Académie des Sciences depuis 2005. Il a reçu cinq prix scientifiques et est rédacteur en chef des Comptes-Rendus Mécanique de l'Académie des sciences. Ses travaux portent essentiellement, quoique non exclusivement, sur la mécanique des solides déformables, particulièrement sur la mécanique de la rupture fragile et ductile, et l'application de la méthode des éléments finis à la mécanique des solides et la science des matériaux.



Yves BRÉCHET

Physicien des matériaux, Saint-Gobain, Académie des sciences

Physicien spécialiste des métaux et des alliages, Yves Bréchet étudie, compare et adapte les matériaux, leurs applications et leurs propriétés. Ses recherches impliquent tout autant des approches fondamentales qu'appliquées, avec des questions spécifiques aux sciences de l'ingénieur, à l'interface entre la physique, la chimie et la mécanique. Directeur scientifique de Saint-Gobain, Yves Bréchet est professeur aux universités Monash (Australie) et McMaster (Canada). Il a été haut-commissaire à l'énergie atomique de 2012 à 2018.

Programme

- 14:30** **Ouverture de la séance**
Patrick FLANDRIN, vice-président de l'Académie des sciences
Étienne GHYS, secrétaire perpétuel de l'Académie des sciences
- 14:40** **La plasticité des verres silicatés**
Étienne BARTHEL, physicien des matériaux, Laboratoire « science et ingénierie de la matière molle - physico-chimie des polymères et milieux dispersés », ESPCI Paris
- 15:00** Discussion
- 15:10** **Plasticité des cristaux métalliques : mécanismes physiques et modélisation mécanique continue**
Samuel FOREST, mécanicien des solides, Centre des Matériaux, MINES ParisTech
- 15:30** Discussion
- 15:40** **Matériaux ultra minces autoportés – terrain de jeu pour de nouveaux croisements entre mécanique et physique de l'état solide**
Thomas PARDOEN, mécanicien et physicien des matériaux, Institut de Mécanique des Matériaux et du Génie Civil, Université Catholique de Louvain
- 16:00** Discussion
- 16:10** **Motifs de rupture : que nous apprend la rugosité des fissures sur la rupture des matériaux ?**
Laurent PONSON, mécanicien des solides, Institut Jean Le Rond d'Alembert, Sorbonne Université
- 16:30** Discussion
- 16:40** **Conclusion**

Résumés et biographies



Étienne BARTHEL

Physicien des matériaux, Laboratoire « science et ingénierie de lamatière molle - physico-chimie des polymères et milieux dispersés », ESPCI Paris

Après une thèse en physique des solides portant sur le transport électronique non-linéaire de l'état onde de densité de spin, menée à l'université d'Orsay, Etienne Barthele a rejoint le laboratoire Surface du Verre et Interfaces (CNRS - Saint-Gobain), près de Paris, où il a développé des études fondamentales sur la réponse mécanique des surfaces et des interfaces en relation avec les produits et procédés de ce groupe industriel. Ses principaux centres d'intérêt étaient ainsi l'adhésion, le mouillage, les couches minces et la plasticité des verres de silicate. Plus récemment, il a commencé à travailler dans le domaine de la matière molle au laboratoire SIMM (Science et ingénierie de la matière molle - ESPCI/CNRS/SU), et tout particulièrement sur la dynamique de fronts fortement dissipatifs, en relation avec le mouillage de liquides visqueux et le décollement d'adhésifs mous.

La plasticité des verres silicatés

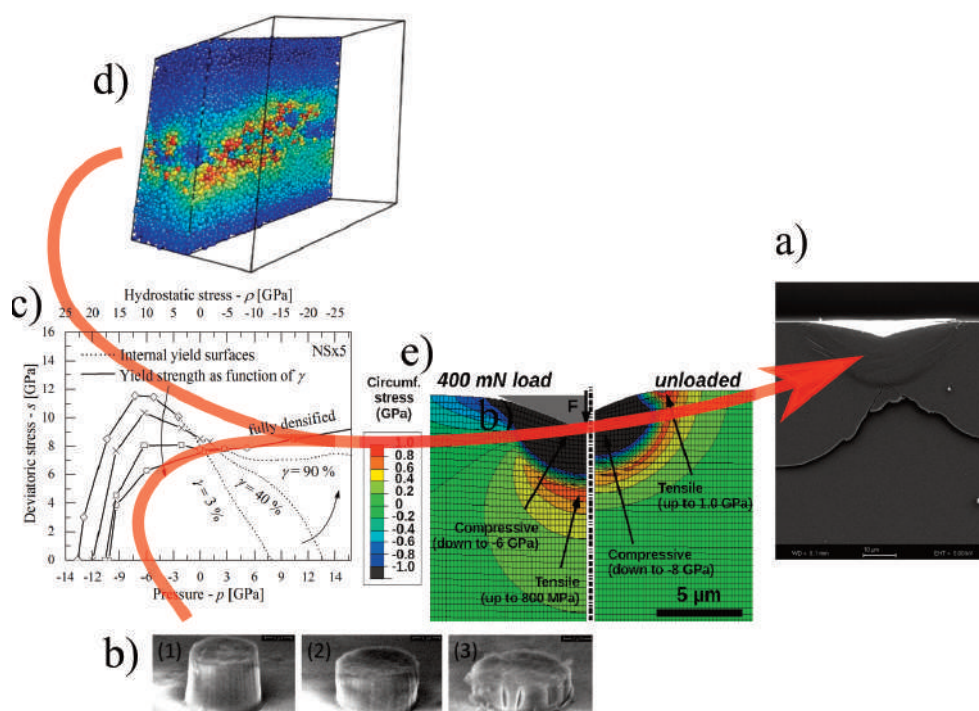
Les silicates amorphes (ou verres silicatés) sont improprement réputés fragiles. Appréhender leur comportement plastique est cependant difficile, puisque : 1° cette plasticité ne se manifeste qu'aux échelles micrométriques ; 2° en l'absence d'ordre cristallin, la plupart des techniques de mesure de la structure deviennent presque aveugles, et établir des relations entre réponse mécanique et structure devient dès lors très difficile, et 3° il est connu depuis fort longtemps que cette plasticité n'est pas isochore... Face à ces difficultés, nous avons couplé des méthodes de chargement mécanique à l'échelle micronique avec des techniques optiques ou spectroscopiques de mesure locale des champs de déformation. Nous montrerons que les résultats rendent possible l'élaboration et la calibration de lois de comportement, pertinentes pour la plasticité des silicates. Quant aux mécanismes de cette plasticité à l'échelle atomiques, notre compréhension en est alimentée par la simulation par dynamique moléculaire qui, comme nous le montrerons, peut être utilisée pour calculer ces mêmes lois de comportement plastique pour des systèmes analogues, ouvrant ainsi la voie à une fructueuse comparaison avec les résultats expérimentaux.

Bibliographie :

Impact of pressure on plastic yield in amorphous solids with open structure Mantsi, B.; Kermouche, G.; Barthele, E.; Tanguy, A. *Physical Review E* 93 (2016) 033001

Plastic deformation and residual stresses in amorphous silica pillars under uniaxial loading R. Lacroix, G. Kermouche, J. Teisseire and E. Barthele *Acta Materialia* 60 (2012) 5555–5566

Mechanical modelling of indentation induced densification of silica G. Kermouche, E. Barthele, D. Vandembroucq and P. Dubujet *Acta Materialia* 56 (2008) 3222-3228



Samuel FOREST

Mécanicien des solides, Centre des Matériaux, MINES ParisTech

Samuel Forest est directeur de recherches au CNRS et professeur de mécanique des milieux continus à l'Ecole des Mines de Paris. Il a obtenu son doctorat en sciences et génie des matériaux en 1996 et son habilitation à diriger des recherches en mécanique en 2004. Ses travaux visent à introduire les aspects physiques de la déformation et de la rupture des matériaux dans le cadre de la modélisation mécanique continue. Ils concernent en particulier la plasticité des alliages métalliques, notamment pour les applications industrielles aéronautiques. Il a participé activement aux développements récents de la mécanique des milieux continus généralisés qui consistent à intégrer des longueurs internes dans le modèle continu classique. Il a reçu les médailles de bronze (1998) et d'argent (2012) du CNRS, ainsi que le prix Plumey (2008) de l'Académie des sciences. Il est devenu récemment *Fellow of the Euromech Society* pour ces contributions en métallurgie mécanique. Il est éditeur associé pour les journaux *Philosophical Magazine* et *International Journal of Solids and Structures*, et membre du comité éditorial de plusieurs autres revues internationales.

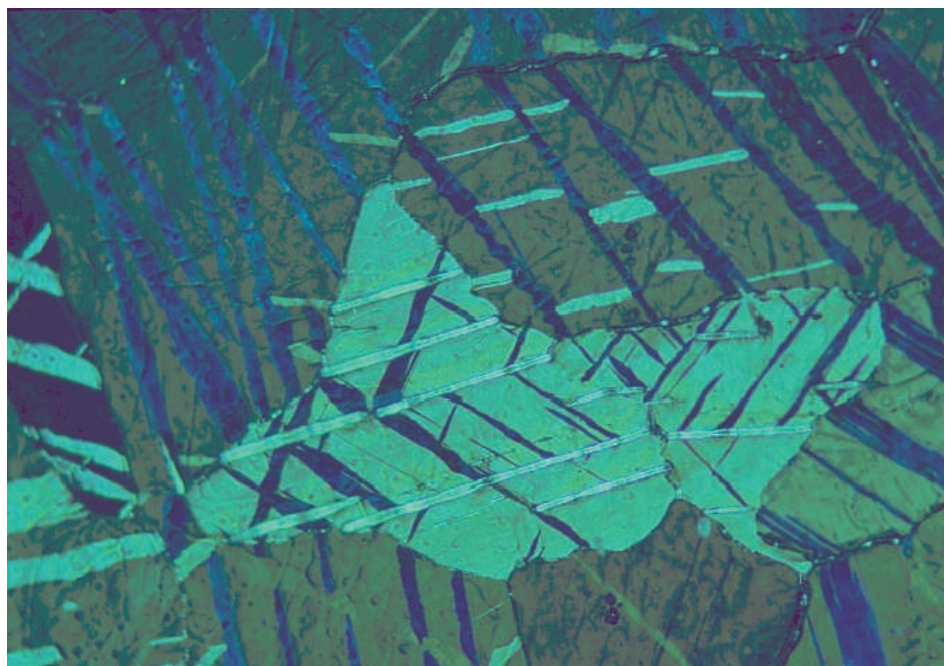


Plasticité des cristaux métalliques : mécanismes physiques et modélisation mécanique continue

La métallurgie physique nous enseigne la richesse des modes de déformation et d'endommagement des matériaux cristallins métalliques : plasticité, par le truchement du mouvement des dislocations, phénomènes de maclage et de clivage qui se déroulent à l'échelle du micromètre. Le caractère discret des événements observés à cette échelle est un véritable défi à la modélisation continue. Et pourtant, nous montrerons comment la mécanique des milieux continus est en mesure d'assimiler certains de ces mécanismes et de faire des prévisions affinées sur la déformation et la rupture des structures industrielles. Pour cela, le modèle mécanique continu classique est profondément rénové en l'enrichissant par des variables internes physiques (plasticité cristalline), des degrés de liberté supplémentaires (milieux de Cosserat) ou des gradients d'ordre supérieur (plasticité à gradient)¹. Les applications sélectionnées concernent la déformation des aubes de turbine monocristallines de moteurs d'avion² et les revêtements de zinc des tôles galvanisées pour l'industrie automobile³.

Bibliographie :

1. S. Wulfinghoff, S. Forest and T. Böhlke, Strain gradient plasticity modelling of the cyclic behaviour of laminate microstructures, *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, vol. 79, pp. 1-20, 2015.
2. P.A. Sabnis, S. Forest, N.K. Arakere and V.A. Yastrebov, Crystal plasticity analysis of cylindrical indentation on a Ni-base single crystal superalloy, *International Journal of Plasticity*, vol. 51, pp. 200-217, 2013.
3. R. Parisot, S. Forest, A. Pineau, E. Nguyen, X. Demonet and J.-M. Mategne, Deformation and Damage Mechanisms of Zinc Coatings on Galvanized Steel Sheets, Part I: Deformation Modes, *Metallurgical and Materials Transactions*, vol. 35A, pp. 797-811, 2004.





Thomas PARDOËN

Mécanicien et physicien des matériaux, Institut de Mécanique des Matériaux et du Génie Civil, Université Catholique de Louvain

Thomas Pardoën est professeur à l'École Polytechnique de Louvain et président, depuis 2015, de l'Institut de Mécanique, Matériaux et Génie Civil de l'UCLouvain en Belgique. Hors UCLouvain, il est aussi président depuis 2014 du Conseil Scientifique du Centre d'Etude de l'Energie Nucléaire belge SCK•CEN. Il a réalisé des études d'ingénieur, une maîtrise en philosophie et une thèse de doctorat en sciences appliquées (1998) à l'UCLouvain. Il a été post-doctorant à l'Université de Harvard avant de revenir à l'UCLouvain comme académique en 2000. Ses intérêts de recherche couvrent les domaines de la nano-, micro- et macro-mécanique des matériaux en se concentrant sur une approche multi-échelle et physique des mécanismes de déformation et rupture, en présence également de couplages avec des propriétés fonctionnelles ou les effets de l'irradiation. T. Pardoën s'intéresse aux différentes classes de matériaux, en particulier les matériaux hybrides, composites et architecturés, les alliages métalliques, les polymères d'ingénierie, et les couches minces. Il a supervisé pratiquement 50 thèses de doctorat et 20 post-doctorants. Il est membre des comités éditoriaux des revues *J. Mech. Phys. Solids*, *Engng. Fract. Mech.* et *Int. J. Damage Mech.* Il a publié plus de 200 articles dans des journaux internationaux et reçu près de 8000 citations (Scopus). Il a obtenu en 2011 le Grand Prix Alcan de l'Académie des sciences française et une Chaire Francqui de l'Université de Liège en 2015. Il a été nommé *Euromech Fellow* en 2015.

Matériaux ultra minces autoportés – terrain de jeu pour de nouveaux croisements entre mécanique et physique de l'état solide

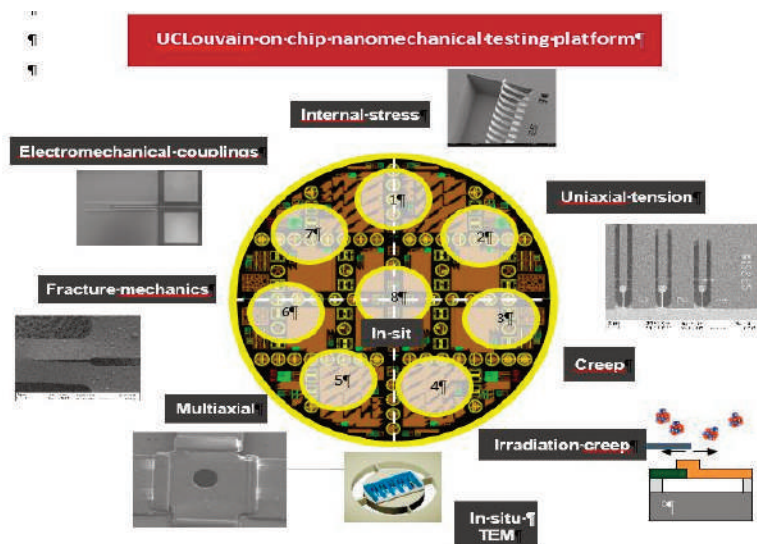
Les techniques de micro- et nano-fabrication dérivées de la microélectronique permettent l'élaboration de films suspendus d'épaisseur nanométrique intégrés directement dans des structures d'essai mécanique inspirées de microsystèmes électromécaniques (MEMS). Ces techniques mènent d'abord à la mesure délicate de propriétés mécaniques aux échelles les plus fines et mettent en évidence une panoplie d'effets de taille liés à des phénomènes souvent absents aux échelles supérieures. Parfois, les propriétés théoriques prédites par calcul ab-initio pour des matériaux parfaits sont atteintes expérimentalement. Ces approches permettent aussi, dans des matériaux quasi idéaux – monocristaux, polycristaux avec un grain sur l'épaisseur et une texture parfaite, amorphes avec ordre local contrôlé – d'étudier les mécanismes physiques fondamentaux de déformation et rupture. En particulier, ces dispositifs sont aisément étendus à des essais in situ au sein de microscopes électroniques en transmission, ce compris avec la prise en compte d'effets de température et d'environnement. Enfin, des couches minces sous hautes contraintes mécaniques montrent des phénomènes couplés comme la piézorésistance ou la flexoélectricité. Des progrès récents au niveau de ce domaine seront décrits et révéleront un terrain de jeu fascinant pour croiser physique et mécanique.

Bibliographie :

T. Pardoën, M.-S. Colla, H. Idrissi, B. Amin-Ahmedi, B. Wang, D. Schryvers, J.-P. Raskin, A versatile lab-on-chip platform to characterize elementary deformation mechanisms and electro-mechanical couplings in nanoscopic objects, *Comptes Rendus Physique* 17, 3-4 (2016) 485-495

Sanjit Bhowmick, Horacio Espinosa, Katherine Jungjohann, Thomas Pardoën, and Olivier Pierron, Advanced microelectromechanical systems-based nanomechanical testing: Beyond stress and strain measurements, *MRS Bulletin* 44 (2019) 487-493

A. Pineau, A.A. Benzerga, T. Pardoën, Failure of metals – III. Fracture and fatigue of nanostructured metallic alloys, *Acta Materialia* 107 (2016) 508-544



Laurent PONSON

Mécanicien des solides, Institut Jean Le Rond d'Alembert, Sorbonne Université

Laurent Ponson est actuellement chercheur au CNRS à l'Institut d'Alembert de mécanique de Sorbonne Université, où il a dirigé de 2013 à 2018 l'équipe Mécanique et ingénierie des solides et des structures.

Diplôme de l'Ecole Centrale Paris en 2003, il obtient un doctorat de physique de l'Ecole Polytechnique en 2006 pour ses travaux sur la statistique des surfaces de rupture qui lui valent un prix de thèse de la Société Française de Physique. Il poursuit ensuite sa carrière au département de mécanique du *California Institute of Technology* aux Etats-Unis où il y travaille trois ans comme post-doctorant Marie Curie avant de rejoindre le CNRS en 2011.

Laurent est reconnu au niveau international pour ses travaux sur la rupture des matériaux. Physicien de formation, il développe un nouveau cadre théorique où les concepts classiques de mécanique sont complétés par ceux de la physique statistique des systèmes complexes. Cette approche originale permet de décrire les effets collectifs mis en jeu lors de la rupture des matériaux, et ainsi mieux appréhender le lien entre leurs caractéristiques microstructurales et leur tenue mécanique. Ce nouveau cadre permet également de rendre compte de mécanismes jusqu'ici mal compris, comme l'existence de signaux précurseurs à la ruine des matériaux ou encore l'émergence de formes fractales complexes après leur rupture.

Par ailleurs, Laurent est fortement impliqué dans le transfert de ses travaux de recherche à l'industrie à travers la start-up Tortoise qu'il a fondé en 2017 ainsi que dans la vulgarisation de la mécanique auprès du grand public.



Motifs de rupture : que nous apprend la rugosité des fissures sur la rupture des matériaux ?

La fractographie, ou l'étude de la géométrie des faciès de rupture, est une technique de l'ingénieur qui a pour but de déterminer l'origine de la rupture d'une pièce. Depuis une trentaine d'années et les travaux pionniers de Mandelbrot, l'analyse statistique quantitative de la rugosité des fissures s'est imposée comme une alternative à la traditionnelle étude "à l'œil nu" des faciès.

Je présenterai quelques avancées remarquables récentes de cette "fractographie quantitative" qui illustrent comment la physique statistique de la rupture révèle les mécanismes élémentaires de fissuration des matériaux.

Au point qu'elle permet aujourd'hui de revisiter des concepts classiques de mécanique comme la rupture fragile, quasi-fragile ou ductile, mais offre également de nombreuses perspectives en science de l'ingénieur afin de déterminer, post-mortem, les causes racine d'une défaillance mécanique et caractériser de façon simple et rapide les propriétés mécaniques des matériaux.

Bibliographie :

1. Ponson L. Statistical aspects in crack growth phenomena: How the fluctuations reveal the failure mechanisms. Invited review article for the 50th years anniversary of Int. J. Frac. 201, 11-27 (2016).
2. Vernède S., Ponson L. & Bouchaud J. P. Turbulent fracture surfaces : A footprint of damage percolation ? Phys. Rev. Lett. 114, 215501 (2015).
3. Auvray N., Negi N., Trancart S. & Ponson L. L'analyse statistique des faciès de rupture : la science de la donnée au service de l'analyse de défaillance. Traitements & Matériaux 459, 47-50 (2019).





INSTITUT DE FRANCE
Académie des sciences

Inscriptions ouvertes au public dans la limite des places disponibles.

www.academie-sciences.fr

(rubrique «prochains évènements»)

