ED SMAER

Sujet de thèses 2013

Laboratoire : Institut Jean le Rond d'Alembert et Laboratoire de Physique et Mécanique des Milieux Hétérogènes

Etablissement de rattachement : UPMC - CNRS

Directeur de thèse et section CNU ou CNRS : Benoît Roman (CNRS, section 9)
Codirection et section CNU ou CNRS : Laurent Ponson (CNRS, section 9)

Titre de la thèse : **Ruture ductile et endommagement dans les matériaux hétérogènes: comment déchiffrer les surfaces de rupture**

Collaborations dans le cadre de la thèse :
1. Dr. Harold Auradou, Laboratoire FAST, UPMC
2. Pr. J.B. Leblond, Institut Jean le Rond d'Alembert, UPMC
3. Pr. Alan Needleman, University of North Texas, USA

Résumé du sujet :

Depuis près d'un demi-siècle, les ingénieurs savent décrire et prévoir la propagation d'une fissure dans un milieu élastique homogène modèle. Le cas des matériaux réels est beaucoup plus complexe. En effet, on ne sait toujours pas relier la durée de vie et la résistance d'un matériau à sa microstructure. Passage obligé avant de telles prédictions, il est nécessaire de comprendre comment le désordre structurale du matériau et l'endommagement qui s'y développe affectent le comportement d'une fissure.

Les surfaces de rupture représentent un champ d'investigation très prometteur pour aborder cette question : leur géométrie, et en particulier les propriétés statistiques de leur rugosité, sont autant d'indices laissés par la fissure au cours de son passage dans le matériau, et susceptibles de révéler le rôle joué par la microstructure et l'endommagement sur sa propagation. Mais encore faut-il savoir les déchiffrer! Au cours de cette thèse, on utilisera d'une part (i) des outils numériques qui permettent de décrire de façon réaliste la propagation de fissure dans des matériaux ductiles hétérogènes et d'autre part (ii) des tests de rupture sur des alliages avec une microstructure bien contrôlée suivie d'une analyse des surfaces de rupture produites. Les surfaces de rupture obtenues par ces deux approches seront analysées et interprétées à partir d'outils et de modèles issus de la mécanique de la rupture et de la physique statistique des systèmes désordonnés. Cette analyse nous permettra de relier les processus de rupture et d'endommagement à l'échelle microscopique avec la trajectoire des fissures. Un modèle de propagation de fissure ductile prenant en compte la microstructure du matériau et son évolution sera alors développé au vu des mécanismes élémentaires de fissuration révélés par cette étude.

L'étudiant devra mettre en œuvre des outils et des concepts issus aussi bien de la mécanique du solide que de la physique des systèmes complexes, ainsi que les outils de modélisation numérique adaptés à l'étude du comportement mécanique des matériaux.

Rupture ductile et endommagement dans les matériaux hétérogènes : Comment déchiffrer les surfaces de rupture ?

1. Objectif de la thèse

Cette thèse porte sur l'étude du couplage entre fissure, endommagement et microstructure au cours de la rupture des matériaux ductiles. Ces phénomènes complexes seront explorés via l'étude des propriétés statistiques de la rugosité des surfaces de rupture qui encodent l'interaction entre endommagement et microstructure lors de la rupture d'un matériau. Ce travail permettra d'améliorer notre compréhension des mécanismes microscopiques de rupture, et mènera au développement de modèles de rupture plus réalistes prennant en compte le rôle crucial joué par la microstructure des matériaux ductiles sur leur propriétés macroscopiques de rupture (tenacité, vitesse de fissuration, durée de vie…). Un autre objectif de ce travail est le développement de méthodes d'analyse fractographiques qui permettront d'extraire à partir des surfaces de rupture, de nombreuses informations sur (i) les processus microscopiques d'endommagement au cours de la rupture (taille de la zone d'endommagement, densité de microfissures…) et (ii) sur l'historique de la rupture d'un matériau ou d'une structure, comme la direction de propagation de la fissure, son sens de propagation ou le point d'initiation. Pour ces applications plus pratiques, le dépôt d'un brevet dans le domaine de l'expertise de pièces ou de structures est envisagé.

2. Contexte scientifique

Depuis près d'un demi-siècle, les ingénieurs savent décrire et prévoir la propagation d'une fissure dans un milieu élastique homogène modèle. Le cas des matériaux réels est beaucoup plus complexe. En effet, on ne sait toujours pas relier la durée de vie et la résistance d'un matériau à sa microstructure. Passage obligé avant de telles prédictions, il est nécessaire de comprendre comment le désordre structurale du matériau et l'endommagement qui s'y développe affectent le comportement d'une fissure.

Les surfaces de rupture représentent un champ d'investigation très prometteur pour aborder cette question : leur géométrie, et en particulier les propriétés statistiques de leur rugosité, sont autant d'indices laissés par la fissure au cours de son passage dans le matériau, et susceptibles de révéler le rôle joué par la microstructure et l'endommagement sur sa propagation. Mais encore faut-il savoir les déchiffrer! Ces surfaces, comme celles représentées en Fig. (a), présentent des propriétés statistiques d'invariance d'échelle tout à fait remarquables, indépendantes du matériau et du mode de chargement, mais dont l'origine reste encore largement inexpliquée.

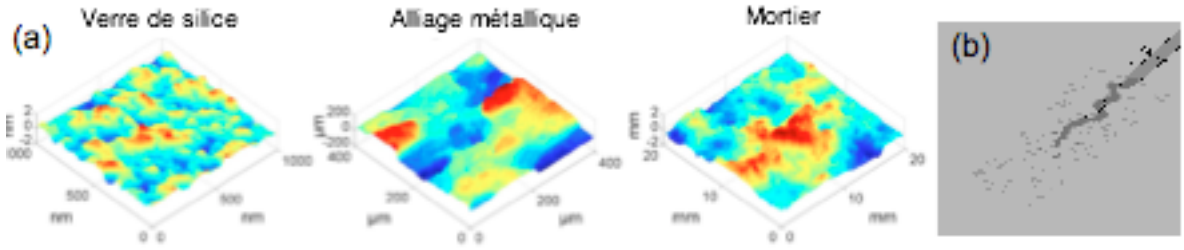

Figure: (a) Trois surfaces de rupture de trois matériaux a priori très différents observés à des différentes échelles. Et pourtant, la rugosité de ces surfaces partage des propriétés

statistiques "fractales" similaires. (b) Le mode de rupture dans ces matériaux, caractérisé par la nucléation, la croissance puis la coalescence de cavités d'endommagement (présentées ici pour un métal, d'après un calcul numérique [1]) présente certaines similarités, bien qu'intervenant à des échelles très différentes. Assez pour expliquer les ressemblances troublantes entre leurs surfaces de rupture?

Très récemment, un lien quantitatif a pu être établi entre ces propriétés statistiques et l'endommagement microscopique mis en jeux au cours de la rupture des matériaux [1,2]. Ces travaux ouvrent de réelles perspectives pour l'étude des mécanismes d'endommagement comme la cavitation ductile ou la microfissuration via des études fractographiques. En particulier, ils offrent la possibilité de remonter *post-mortem* à l'évolution et au développement de l'endommagement au cours de la rupture, et d'étudier ainsi le rôle crucial joué par la microstructure du matériau, et son effet sur la réponse macroscopiques à rupture des solides comme la ténacité.

3. Démarche scientifique et résultats attendus

Ce travail de thèse s'appuiera à la fois sur des outils numériques puissants qui permettent de décrire de façon réaliste la microstructure des matériaux ductiles et son évolution au cours de la rupture [1,3] ainsi que des expériences de rupture sur des alliages avec une microstructure contrôlée accompagnée d'une étude de la morphologie des surfaces de rupture obtenue.

La première partie de la thèse sera dédiée à l'interprétation de la rugosité des surfaces de rupture en terme de processus microscopique de rupture et d'endommagement. S'appuyant sur des progrès récents importants en terme d'analyse statistique des surfaces de rupture [1,2], l'étudiante en thèse développera des outils performants permettant de relier les propriétés statistiques de la rugosité des surfaces ductiles avec les processus d'endommagement. Ces méthodes d'analyse fractographique seront développées et validées à partir des simulations numériques de rupture ductiles qui permettent d'explorer le rôle de la microstructure et de l'endommagement dans les matériaux ductiles sur les surfaces de rupture produites [1,3]. Cette partie s'effectuera en collaboration avec A. needleman qui travaille avec Laurent Ponson depuis un an.

Ces méthodes seront ensuite appliquées sur des exemples expérimentaux en utilisant des alliages dont les propriétés de rupture et la microstructure peuvent être modifiées de façon contrôlée. Les surfaces de rupture produites dans les expériences sont analysée par profilométrie optique (collaboration avec H. Auradou du laboratoire FAST). Puis elles sont analysée, afin de caractériser de façon quantitative les processus microscopiques d'endommagement, comme par exemple la densité de microfissure/cavités d'endommagement, taille de zone d'endommagement, en fonction des paramètres de chargement et des paramètres microstructuraux. Cette étude permettra notamment de révéler les différents mécanismes d'endommagement lors de la rupture ductile par fatigue ou par chargement rapide. Elle permettra également de mieux comprendre le rôle joué par les inclusions et leur densité sur ces mécanismes d'endommagement, et à plus grande échelle, sur la ténacité des matériaux ductiles.

Enfin, dans une troisième partie, la caractérisation des processus microscopique de rupture ductile et leur interaction avec la microstructure des matériaux sera mis en œuvre pour le développement de modèles de rupture plus performants. D'une part, les modèles de type Gurson [3] de rupture ductile développés actuellement pourront être enrichis pour tenir compte des observations faites dans la partie précédente (collaboration avec Jean-Baptiste Leblond). D'autre part, des modèles statistiques permettant une description simplifiée des mécanismes d'endommagement et de leur couplage avec la microstructure du matériau seront développés en s'inspirant des succès récents de telles approches en rupture fragile [4-6] et quasi-fragile [7].

4. Profil recherché

L'étudiant devra mettre en œuvre des outils et des concepts issus aussi bien de la mécanique du solide que de la physique des systèmes complexes utiles pour l'analyse des surfaces de rupture. Il devra être également familiers avec les approches numériques, et notamment les outils permettant de modéliser le comportement mécanique des matériaux.

5. Bibliographie

[1] L. Ponson, Y. Cao, E. Bouchaud, V. Tvergaard et A. Needleman, 'Statistics of ductile fracture surfaces: the effect of material parameters' *Int. J. Frac.* (accepté pour publication, DOI 10.1007/s10704-013-9846-z).
[2] S. Vernède, Y. Cao, J.P. Bouchaud et L. Ponson, 'Non Gaussian statitistics of experimental fracture surfaces', soumis à *Phys. Rev. Lett.*.
[3] A.L. Gurson, 'Plastic flow and fracture behavior of ductile materials incorporating void nucleation, growth and interaction'. Ph.D. Thesis, Brown University (1975).
[4] D. Bonamy, S. Santucci et L. Ponson, 'Crackling dynamics in material failure as the signature of a self-organized dynamic phase transition', *Phys. Rev. Lett.* **101**, 045501 (2008).
[5] L. Ponson et D. Bonamy, 'Crack propagation in brittle heterogeneous solids: Material disorder and crack dynamics', *Int. J. Frac.* **162**, 21-31 (2010).
[6] D. Bonamy et E. Bouchaud, 'Failure of heterogeneous materials: A dynamic phase transition?', Phys. Rep. **498**, 1-44 (2011).
[7] V. Demery, D. Kondo et L. Ponson, 'Quasi-brittle failure of heterogeneous materials as a depinning transition' (en préparation).