

## Présentation du projet de thèse

Laboratoire : Institut Jean le Rond d'Alembert

Etablissement de rattachement : Université Pierre et Marie Curie

Titre de la thèse : Endommagement, fluctuations et localisation dans les matériaux quasi-fragiles désordonnés

Directeur de thèse : Laurent Ponson

Mail de contact : [laurent.ponson@upmc.fr](mailto:laurent.ponson@upmc.fr)

### Résumé du sujet

Le développement de matériaux performants d'un point de vue mécanique et toujours plus légers est aujourd'hui un enjeu technologique majeur. Cependant, le lien entre microstructure des matériaux et résistance à la rupture reste relativement mal compris. L'objectif de cette thèse est de développer un cadre théorique permettant de décrire quantitativement le processus de localisation et de rupture dans les matériaux quasi-fragiles hétérogènes à travers une modélisation multi-échelle fine des phénomènes de microfissuration. Ce mécanisme de rupture est omniprésent. Il est par exemple mis en jeu dans les bétons [1] ou dans les roches [2,3] soumis à de forts niveaux de contrainte. Des phénomènes semblables d'endommagement et de localisation interviennent également dans les matériaux comme les mousses ou les solides microstructurés en nid d'abeille [4]. La microstructure de ces matériaux, et en particulier la variation de leurs propriétés mécaniques à petite échelle, joue un rôle central dans la sélection de leur comportement à rupture à grande échelle. Ce projet de thèse consiste à développer des outils théoriques permettant de relier ces deux échelles afin d'établir des lois prédictives moins phénoménologiques que celles utilisées actuellement par les ingénieurs et les scientifiques dans des domaines comme la mécanique des matériaux, le génie civil ou la géophysique.

---

## Sujet développé

### Objectif de la thèse

Le développement de matériaux performants d'un point de vue mécanique et toujours plus légers est aujourd'hui un enjeu technologique majeur. Cependant, le lien entre microstructure des matériaux et résistance à la rupture reste relativement mal compris. L'objectif de cette thèse est de développer un cadre théorique permettant de décrire quantitativement le processus de localisation et de rupture dans les matériaux quasi-fragiles hétérogènes à travers une modélisation multi-échelle fine des phénomènes de microfissuration. Ce mécanisme de rupture est omniprésent. Il est par exemple mis en jeu dans les bétons [1] ou dans les roches [2,3] soumis à de forts niveaux de contrainte. Des phénomènes semblables d'endommagement et de

---

**Laurent Ponson**

☎: 01 44 27 37 94 - 06 84 10 75 16

[laurent.ponson@upmc.fr](mailto:laurent.ponson@upmc.fr)

# Fracture Lab' – Institut Jean le Rond d'Alembert

localisation interviennent également dans les matériaux comme les mousses ou les solides microstructurés en nid d'abeille [4]. La microstructure de ces matériaux, et en particulier la variation de leurs propriétés mécaniques à petite échelle, joue un rôle central dans la sélection de leur comportement à rupture à grande échelle. Ce projet de thèse consiste à développer des outils théoriques permettant de relier ces deux échelles afin d'établir des lois prédictives moins phénoménologiques que celles utilisées actuellement par les ingénieurs et les scientifiques dans des domaines comme la mécanique des matériaux, le génie civil ou la géophysique.

## *Contexte et enjeux scientifiques et technologiques*

Pour décrire l'endommagement progressif des matériaux comme les roches et les bétons, les théories actuelles utilisent des approches de type milieu continu basées sur la définition d'un volume élémentaire représentatif (VER) [5,6]: en tout point du matériau, le comportement suit celui de ce VER possédant un niveau d'endommagement donné par la densité de microfissures en ce point. En plus de l'équation décrivant le comportement mécanique du VER, on a recours à une autre équation permettant de prévoir l'évolution de l'endommagement dans le matériau. La relation entre les caractéristiques du matériau à l'échelle de l'endommagement (la densité de microfissures) et le comportement mécanique du VER est établie via des techniques d'homogénéisation qui permettent de relier (de façon approximative) les différentes échelles mises en jeu au cours de la microfissuration des matériaux.

Ces méthodes s'avèrent efficaces pour décrire le comportement du matériau lorsque celui-ci est loin de son seuil de rupture, c'est-à-dire pour des densités de microfissures relativement faibles. Mais elles s'avèrent insuffisantes dès qu'il s'agit de décrire son comportement proche de la rupture. En effet, à de tels niveaux d'endommagement, les interactions entre les microfissures présentes dans le matériau jouent un rôle prépondérant et gouvernent sa réponse mécanique, alors que la définition d'un volume représentatif suppose que le comportement du solide en un point donné ne dépend que du niveau d'endommagement en ce point.

Pour contourner ces difficultés et prendre en compte l'interaction entre les différents éléments constituant un matériau, des modèles dits non-locaux ont été proposés [7,8]. Ils permettent de rendre le comportement d'un élément dépendant de l'état de dégradation des autres éléments constituant le solide étudié. Toutefois, ces modèles reposent sur le choix, généralement arbitraire, du type de non-localité utilisé dans la formulation du modèle. Récemment, Laurent Ponson et ses collaborateurs ont montré que la nature de la non-localité mise en œuvre dans les problèmes d'endommagement pouvait être déterminée de façon exacte en considérant les interactions élastiques entre les hétérogénéités présentes dans le matériau [9,10]. Cette fonction non-locale dépend du modèle d'endommagement local choisi et du chargement imposé. Cette approche a été validée expérimentalement à travers des tests mécaniques réalisés sur un matériau modèle avec une microstructure simple et contrôlée, et pour un chargement uniaxial relativement simple également.

A ce point, il est crucial (i) de pousser plus loin la comparaison entre théorie et expérience en considérant des chargements multiaxiaux plus complexes (ii) de mettre en œuvre cette approche dans le contexte d'un matériau 'standard' comme un mortier ou une roche (iii) d'utiliser cette approche théorique pour prévoir la structure statistique des précurseurs à la rupture, et mettre en œuvre cette description dans le contexte de la surveillance des structures et la prédiction de leur ruine.

Au delà de la prédiction du seuil de rupture des matériaux à partir de leurs propriétés à l'échelle microscopique, un autre enjeu scientifique et technologique de la thèse porte sur la compréhension des propriétés statistiques remarquables des fluctuations émergents lors de l'endommagement progressif des matériaux hétérogènes ; et de leur utilisation pratique dans le contexte du monitoring de structure. Les approches développées au cours de cette thèse chercheront à fournir une description statistique des précurseurs à la rupture et de leur évolution à l'approche de la localisation. Elles permettront de déchiffrer les signaux complexes (émission acoustique, mesures locales de déformation...) mesurés au cours de la vie d'une structure, et ainsi d'anticiper sa ruine, ce qui représente un enjeu majeur pour la sécurité dans des contextes aussi variés que le génie civil, le nucléaire, l'aérospatiale ou l'aéronautique. Cette démarche pourra s'inspirer de celle récemment suivie dans le contexte de l'analyse statistique des surfaces de rupture [11]. La compréhension fine de la structure statistique de la rugosité des surfaces de rupture a permis de

# Fracture Lab' – Institut Jean le Rond d'Alembert

développer une technique d'analyse de défaillance basée sur le traitement statistique des faciès qui a donné lieu au dépôt d'un brevet [12] qui est aujourd'hui commercialisé par la start-up Tortoise [13]. Une telle valorisation est tout à fait envisageable dans le cadre du développement d'outils statistiques permettant d'analyser les signaux émis par les matériaux au cours de leur endommagement permettant la prédiction, et donc la prévention, de leur ruine.

## *Methodologie et plan détaillé de la thèse*

La méthode suivie au cours de cette thèse s'appuiera tout d'abord sur un aller-retour entre (a) des expériences réalisées sur des matériaux modèles dont la microstructure peut-être contrôlée et variée grâce à des techniques d'impression 3D, sous des chargements eux aussi contrôlés à partir d'une machine de test biaxiale et (b) des développements théoriques basés sur l'approche non-locale décrite précédemment. La comparaison entre expérience et théorie doit permettre (i) de guider la modélisation (ii) de mettre en évidence de nouveaux phénomènes (iii) de valider les approches théoriques proposées.

Les comparaisons entre expérience et théorie se feront sur (a) la réponse mécanique à l'échelle de l'échantillon, et notamment sur le seuil de localisation et de rupture, (b) la structure spatiale des champs mécaniques, et plus particulièrement des champs de déformation et d'endommagement qui seront mesurés à partir de technique de corrélation d'images (c) sur la statistique des précurseurs à la localisation. Cette dernière sera caractérisée à partir (i) des fluctuations observées dans la réponse contrainte-déformation observée à l'échelle de l'échantillon, (ii) des fluctuations observées à l'échelle locale sur les champs mécaniques, et (iii) des signaux acoustiques émis lors de l'endommagement du matériau.

Dans un deuxième temps, cette démarche sera mise en œuvre dans le cadre d'un matériau plus complexe, comme un mortier ou une roche. L'argilite qui est un matériau étudié à d'Alembert dans le cadre d'une collaboration avec Andra dans le contexte de l'enfouissement des déchets est une option envisagée. Cette deuxième étape vise à valider l'approche scientifique dans une situation plus complexe et apporter la preuve de concept que la ruine du matériau ou de la structure peut-être prédite à partir de la statistique des précurseurs.

Le plan de thèse suivant est envisagé:

*1<sup>ère</sup> année* : La première année sera consacrée (i) à l'étude de la rupture et de la localisation à travers de tests mécaniques biaxiaux sur des matériaux élasto-endommageables hétérogènes modèles, (ii) aux développements de modèles non-locaux avec une fonction d'interaction calculée de façon exacte dans le cadre de chargement bi-axiaux et à la résolution analytique ou numérique de ces modèles afin d'établir des prédictions théorique quant au comportement à rupture des matériaux quasi-fragiles hétérogènes, (iii) à la comparaison entre ces des approches afin d'améliorer la modélisation et valider l'approche théorique.

*2<sup>nde</sup> année* : La seconde année pourra être consacrée en plus grande partie à l'aspect statistique du développement de l'endommagement dans les matériaux hétérogènes, avec l'étude expérimentale des précurseurs à la rupture et de la localisation dans les expériences de tests biaxiaux, la prédiction théorique des propriétés statistiques des fluctuations et des précurseurs à partir des modèles non-locaux décrits précédemment et la comparaison entre ces prédictions et les observations expérimentales.

*3<sup>ème</sup> année* : La troisième année pourra être consacrée à la mise en œuvre de ces approches expérimentales et théoriques dans le contexte d'un matériau plus complexe comme un mortier ou une roche, et la mise en évidence d'une preuve de concept de la prédiction de la ruine d'une structure à partir de la statistique de ses précurseurs.

## *Bibliographie*

- [1] Z. Bazant et J. Planas, 'Fracture and size effect in concrete and other quasibrittle materials', CRC press (1997).
- [2] D. Amitrano, 'Rupture by damage accumulation in rocks', *Int. J. Frac.* **139**, 369–381 (2006).
- [3] M. Ashby and C. Sammis, 'The damage mechanics of brittle solids in compression.', *Pure App. Geophys.*, **133**, 489–521 (1990).
- [4] S. D. Papka et S. Kyriakides, 'Biaxial crushing of honeycombs – Part I : Experiments', *Int. J. Solids Struct.* **36**, 4367 (1999).

## Fracture Lab' – Institut Jean le Rond d'Alembert

- [5] S. Nemat-Nasser et M. Hori, *Micromechanics: Overall properties of heterogeneous materials*, North-Holland (1999).
- [6] E. Sanchez-Palencia et A. Zaoui, *Homogenization Techniques in Composite Media*, Springer-Verlag, (1987).
- [7] G. Pijaudier-Cabot and Z. P. Bazant, 'Nonlocal damage theory', *J. Eng. Mech.* **113**, 1512-1533 (1987).
- [8] G. Pijaudier-Cabot et D. Grégoire, 'A review of non local continuum damage: Modelling of failure', *Network Het. Media* **9**, 575-597 (2014).
- [9] E. Berthier, V. Deméry et E. Berthier, 'Damage spreading in quasi-brittle heterogeneous materials: I. Localization and failure', soumis à *J. Mech. Phys. Solids*.
- [10] V. Deméry, E. Berthier, D. Kondo et L. Ponson, 'Stability of a damaged solids', en préparation.
- [11] S. Vernède, L. Ponson et J.P. Bouchaud, 'Turbulent fracture surfaces : A footprint of damage percolation ?', *Phys. Rev. Lett.* **114**, 215501 (2015).
- [12] S. Vernède et L. Ponson, 'Procédé de caractérisation du mécanisme de fissuration d'un matériau à partir de sa surface de rupture', Brevet français n° 1459525 (2014).
- [13] Start-up Tortoise Analytics, cf. [www.tortoise.io](http://www.tortoise.io)