

ED SMAER

Sujet de thèses 2014

Laboratoire : Institut Jean le Rond d'Alembert

Etablissement de rattachement :

Directeur de thèse et section CNU ou CNRS : Djimédo Kondo (section CNU 60), Institut Jean le Rond d'Alembert.

Codirection et section CNU ou CNRS : Laurent Ponson (section CNRS 9), Institut Jean le Rond d'Alembert et Stéphane Morel, Institut de Mécanique et d'Ingénierie de l'Université de Bordeaux.

Titre de la thèse : Etude de la rupture quasifragile par la méthode des éléments discrets

Collaborations dans le cadre de la thèse:

Résumé du sujet :

Le comportement à rupture des matériaux quasifragiles tels que les bétons, certaines céramiques et un grand nombre de roches est caractérisé par le développement d'une large zone endommagée microfissurée précédant la propagation d'une fissure principale. Cette zone d'élaboration de la rupture (ou *fracture process zone*) où l'énergie élastique stockée dans la structure est dissipée au cours de sa ruine est le siège d'un couplage complexe entre microfissuration et hétérogénéités du matériau via les redistributions des contraintes succédant à la formation des microfissures. C'est cette zone et les mécanismes qui s'y déroulent qui gouvernent les propriétés macroscopiques à rupture des matériaux quasi-fragiles (énergie de rupture, effet coure-R, effets d'échelle...)

Nous proposons d'étudier ces mécanismes à travers des simulations numériques basés sur la Méthode des Eléments Discrets (DEM), initialement utilisée pour la modélisation des systèmes granulaires, et qui apparaît aujourd'hui comme l'outil le plus adapté pour décrire les effets microstructuraux sur la microfissuration et la rupture d'un matériau.

L'objectif de ce travail de thèse est de mieux décrire et de mieux comprendre les mécanismes de microfissuration intervenant à l'échelle de la microstructure dans la zone de process pour ensuite les intégrer dans des modèles prédictifs reliant effets microstructuraux et propriétés macroscopiques à rupture. Ces modèles et la pertinence des simulations numériques seront testés via des expériences de rupture sur des matériaux quasi-fragiles modèles obtenus par impression 3D.

Sujet développé

Le comportement à rupture des matériaux quasifragiles tels que les bétons, certaines céramiques et un grand nombre de roches est caractérisé par le développement d'une large zone endommagée microfissurée précédant la propagation d'une fissure principale. Cette zone d'élaboration de la rupture (ou *fracture process zone*, FPZ) où l'énergie élastique stockée dans la structure est dissipée au cours de sa ruine est le siège d'un couplage complexe entre microfissuration et hétérogénéités du matériau via les redistributions des contraintes succédant à la formation des microfissures. Malgré le caractère intrinsèquement fragile de la microfissuration mis en jeu dans cette zone de rupture, le comportement mécanique mesuré à l'échelle de la structure montre un adoucissement important et une transition progressive vers la rupture totale qualifiée de comportement quasifragile. Le caractère progressif de la rupture est communément traduit à l'échelle macroscopique par une courbe de résistance (augmentation de la résistance à la propagation de la fissure principale) qui, couplée au fait que la zone microfissurée soit de taille conséquente, engendre une dépendance de la contrainte nominale des structures vis à vis de leurs tailles encore appelé effet d'échelle [1,2]. Les propriétés de rupture des matériaux quasifragiles sont donc intimement liées aux mécanismes mis en jeu dans cette zone, conditionnant la valeur de l'énergie de rupture nécessaire à la propagation de la fissure principale conduisant à la ruine de la structure. La description détaillée de la structure spatio-temporelle de l'endommagement qui s'y développe, la compréhension du rôle clé de la microstructure du matériau ainsi que celui du chargement macroscopique appliqué à l'échelle de la structure constitue donc aujourd'hui les principaux verrous vis à vis d'un dimensionnement optimal des structures constituées d'un matériau quasifragile comme le béton. Parmi les modèles les plus utilisés aujourd'hui pour décrire la rupture quasifragile du béton, les approches basées sur la théorie des milieux continus comme les modèles d'endommagement [3] nécessitent une régularisation afin de palier au phénomène de localisation des déformations du à l'adoucissement. Le problème est que la plupart des techniques de régularisation, comme par exemple les modèles de type non-local intégral [4,5], introduisent une longueur caractéristique dans le modèle continu, longueur qui est reliée à la taille de la zone d'élaboration et aux interactions élastiques entre deux points voisins (fonction poids). Le fait que ces modèles peinent à reproduire fidèlement le comportement macroscopique à rupture d'un matériau comme le béton malgré l'introduction artificielle d'une longueur interne, pointe du doigt le rôle clé joué par la microstructure du matériau dans le développement de l'endommagement dans la zone de rupture qui n'est pas pris en compte dans ces approches. Pour palier à cette insuffisance, une modélisation des matériaux quasifragiles par un réseau discrets d'éléments hétérogènes a été proposée, inspirés par des modèles issus de la physique statistique des systèmes désordonnés. Dans ce type d'approche, le solide est décrit comme un assemblage de poutres ou de ressorts dont les seuils de rupture sont distribués aléatoirement [6,7]. Même si ces approches reproduisent qualitativement un certain nombre de phénomènes comme l'effet d'échelle ou la statistique des seuils à rupture [8], une telle description est trop simplifiée pour permettre de reproduire les résultats des tests expérimentaux, et servir d'outils prédictifs pour les ingénieurs. Plus récemment, ces modèles ont été complexifiés afin de reproduire la mésostructure d'un béton (matériau bi-phasique : granulats sphériques et matrice cimentaire) via un réseau de poutres hétérogènes. Si cette approche a montré des perspectives intéressantes pour la description du comportement mécanique à rupture d'éprouvettes expérimentales de béton entaillées homothétiques de différentes dimensions [9], cette modélisation s'est montrée très consommatrice en termes de ressources de calcul, et reste donc cantonné, du moins pour l'instant, à des problèmes bidimensionnels. Qui plus est, elle n'est pas exempte de toutes intrusions au niveau de la longueur interne dans la mesure où une loi cohésive contrainte- ouverture de fissure est

utilisée, contenant de fait une longueur caractéristique.

Parmi les alternatives possible à des descriptions trop simplifiées de la microstructure des matériaux quasi-fragiles, ou à l'extrême opposée, trop complexes, la Méthode des Eléments Discrets (DEM), initialement utilisée pour la modélisation des systèmes granulaires, apparaît aujourd'hui comme le meilleur compromis. Tout d'abord, la DEM permet l'utilisation de particules ayant un sens physique (squelette granulaire) aux grandes échelles, et autorise une grande souplesse dans le type d'interactions entre particules permettant la modélisation d'une grande gamme de microstructure. Elle prend notamment en compte les contacts entre ces dernières et on peut y adjoindre des lois d'union entre particules du type de celle utilisée dans les modèles de réseaux de poutres. De plus, la DEM est basée sur une formulation dynamique qui permet de décrire les processus intrinsèquement dynamique mis en jeu lors de la rupture quasifragiles de matériaux lors des événements soudain de microfissurations observés même pour des taux de sollicitations extrêmement faibles [10]. D'autre part, la DEM semblent mieux armée pour appréhender un certain nombre de mécanismes plus spécifique au béton comme le comportement unilatéral (dissymétrie de raideur constatée lors de cycles de traction-compression engendrée (1) par l'orientation préférentielle des microfissures perpendiculairement à la direction de traction — diminution de la raideur — et (2) la fermeture des microfissures et le contact des lèvres de ces dernières lors de la compression — restauration de la raideur initiale) ainsi que le phénomène de non refermeture des fissures (les courbes contrainte-déformation ne repassent par l'origine du repère lors des cycles de traction-compression) dans la mesure où ces phénomènes sont intimement aux contacts engendrés au niveau des lèvres de fissure. Finalement, les progrès récents accomplis par le groupe I2M-DuMAS sur le développement d'un code de calcul DEM performant permet aujourd'hui d'étudier des systèmes avec un grand nombre de particules, permettant de prendre en compte le caractère tridimensionnel et spatialement étendu du processus de microfissuration.

Dans ce projet, nous proposons donc de modéliser le comportement quasifragile des matériaux à partir de la méthode des éléments discrets (DEM) dans le but de comprendre le processus de formation de la zone d'élaboration de la rupture, le couplage avec la microstructure du matériau et la géométrie de la structure sous chargement.

Equipe de recherche

Notre équipe de recherche est composée de quatre chercheurs : (i) Djimédo Kondo, professeur à l'UPMC et Laurent Ponson, chargé de recherche au CNRS, spécialistes de la rupture et de l'endommagement des matériaux hétérogènes et en particulier des approches statistiques en mécanique des solides. (ii) Stéphane Morel, professeur des universités dans le département GCE de l'Institut de Mécanique et d'Ingénierie (I2M) de l'Université de Bordeaux, spécialiste de la rupture quasifragile des matériaux et notamment des problématiques Génie Civil liées à ce comportement (comportement courbe- R, effet d'échelle), (iii) Jean-Luc Charles de l'équipe du département DuMAS de I2M de l'Université de Bordeaux dans laquelle est développé le code aux éléments discrets GRANOO qui sera utilisé au cours de ce projet. Cette équipe complémentaire rassemble autour d'un même projet des experts de la méthode des éléments discrets, des outils statistiques nécessaires au post-traitement des simulations et de la mécanique de la rupture quasi-fragile qui constitue le cœur de ce projet.

Méthodologie et plan de la recherche

Dans un premier temps, on s'attachera à décrire précisément le comportement unilatéral du béton ainsi que le phénomène de non refermeture de fissure et ce sur la base de critères de rupture fragile au niveau des lois d'union entre particules. Dans cette première phase,

l'influence de la microstructure sera précisément étudiée afin de déterminer s'il est nécessaire ou non de recourir à une microstructure réaliste (squelette granulaire). Sur la base de cette modélisation précise du comportement du béton en traction et compression, les deux grands types de formation de la zone d'élaboration de la rupture seront étudiés :

1. Formation de la zone d'élaboration à partir d'une entaille initiale : développement de la zone d'élaboration en avant de l'entaille initiale jusqu'à atteindre une taille critique conduisant à la formation de la fissure principale.
2. Formation de la zone d'élaboration par localisation de l'endommagement dans les structures non entaillées : endommagement diffus suivi d'une localisation de ce dernier dans une zone d'élaboration de la rupture engendrant la formation d'une fissure principale.

Dans ces deux cas, la structuration spatio-temporelle de l'endommagement sera précisément étudiée et on s'attachera particulièrement à mettre en lumière les relations entre :

1. La microstructure du matériau et la géométrie de la zone d'élaboration de la rupture.
2. La géométrie de la zone d'élaboration et le processus de formation de la fissure principale ainsi que sa géométrie.
3. La géométrie de la zone d'élaboration et l'énergie nécessaire à la propagation de la fissure principale.

Enfin, l'effet de la taille des structures sur le comportement de rupture sera étudié et ce dans le cas de structures entaillées et non entaillées. Pour l'étude des structures de grandes tailles, on aura recours à un couplage entre les méthodes DEM et CNEM (la zone d'intérêt — zone de développement de l'endommagement — étant modélisée via la DEM tandis que le reste de la structure sera considérée via la méthode CNEM).

Bibliographie

- [1] Morel S. 2007. R-curve and size effect in quasibrittle fracture. Case of notched structures. *Int. J. Sol. Struct.* **44**: 4272-4290.
- [2] Morel S., Dourado N. 2011. Size effect in quasibrittle failure: analytical model and numerical simulations using cohesive zone model. *Int. J Solids Struct.* **48**: 1403-1412.
- [3] Mazars J. 1984. Application de la Mécanique de l'Endommagement au Comportement Non-Linéaire et à la Rupture du Béton de Structures. *Doctorat d'état*, Université Paris 6.
- [4] Bažant, Z. P. and Pijaudier Cabot, G. 1987. Measurement of characteristic length of nonlocal continuum. In : Rep. N. 87-12/498m, Center of concrete and geomaterials, Evanston, USA.
- [5] Fichant, S., La Borderie, C. et Pijaudier-Cabot, G. 1999. Isotropic and anisotropic descriptions of damage in concrete structures. *Mech. Coh. Fric. Mat.* **4**: 339-359.
- [6] Roux S. et Herrmann H. 1990. Statistical models for the fracture of disordered media.
- [7] Alava M. J. and Zapperi S. 2006. Statistical models of fracture, *Adv. Physics* **55**, 349-376.
- [8] Manzato C., Shekhawat A., Nukala P. V. V., Alava M., Sethna J. P., Zapperi S. 2012, Fracture strength of disordered media, 2012. *Phys. Rev. Lett.* **108**: 065504.
- [9] Rojas Solano L. B. 2012. Endommagement non-local, interactions et effet d'échelle. *Thèse de doctorat*, Université de Pau et des Pays de l'Adour.
- [10] Baro J., Coral A., Illa X., Planes A., Salje E., Schranz W., Soto-Parra E., Vives E. 2013, *Phys. Rev. Lett.* **110**, 088702.