

IDENTIFICATION ET CALIBRATION DE MODÈLES NON-LOCAUX POUR LA PRÉVISION DE LA RUPTURE DE MATÉRIAUX QUASI-FRAGILES

David Grégoire¹

CNRS/UNIV PAU & PAYS ADOUR/E2S UPPA/Institut Universitaire de France
Laboratoire des Fluides Complexes et leurs Réservoirs-IPRA, UMR5150
Institut Supérieur Aquitain du Bâtiment et des Travaux Publics (ISABTP)
Campus Montaury, 64600 Anglet, France – david.gregoire@univ-pau.fr

Mots-clés : Matériaux quasi-fragiles, Rupture, Endommagement, Calibration, Modèle non-locaux.

Résumé court

La rupture de matériaux quasi-fragiles, tels que les bétons ou les roches, est caractérisée par la présence d'une microfissure entourée par une zone endommagée – siège d'une micro-fissuration diffuse – appelée zone d'élaboration (FPZ for fracture process zone in English). La représentation de la rupture de ces matériaux requière une description appropriée de l'adoucissement induit par cette micro-fissuration progressive et l'introduction d'une longueur caractéristique dans le modèle constitutif correspondant afin de régulariser le problème et d'assurer une dissipation énergétique cohérente. Ainsi, différents modèles d'endommagement non-locaux ont été proposés mettant en jeu une longueur interne, initialement constante et en lien avec la taille de la zone d'élaboration, et différentes techniques ont été proposées pour identifier et calibrer ce nouveau paramètre. Il a ensuite été montré que cette longueur caractéristique ne pouvait rester constante lors des différentes phases de rupture et un des enjeux est alors de trouver des moyens pour calibrer cette évolution.

Résumé long

La simulation numérique et l'analyse à rupture de structures mettant en jeu des matériaux quasi-fragiles, comme les bétons ou les roches, se heurtent aux problèmes liés à l'adoucissement en déformation induit par une microfissuration progressive.

Sous chargement mécanique, ces matériaux sont soumis à un endommagement diffus car, localement, les microfissures naissantes sont arrêtées par des hétérogénéités ou des vides. L'amorçage de la rupture est donc le résultat de la propagation d'une large quantité de micro-fissures qui vont, finalement, coalescer afin de former une macro-fissure. La figure 1.a présente un exemple d'un tel processus de rupture pour une éprouvette de béton pré-entaillée soumise à une sollicitation de flexion trois-points [1]. Dans cette expérience, les événements acoustiques générés par l'ouverture des micro-fissures ont été enregistrés et localisés sur l'échantillon testé. Chaque point de la figure représente de tels événements et les événements les plus rouges sont les plus énergétiques. On voit ainsi qu'un large nombre d'événements acoustiques, et donc de microfissurations associées, sont enregistrés durant la rupture et que ces microfissures sont dispersés sur une large région appelée zone d'élaboration (FPZ).

Cette microfissuration diffuse induit une réponse mécanique caractéristique des matériaux quasi-fragiles où un adoucissement est observé (figure 1.b issue de [2]). Cet adoucissement a pour conséquence une prédiction de la rupture sans dissipation d'énergie qui n'est pas physiquement fondée [3] et les équations d'équilibre perdent leur caractère elliptique.

Pour pallier à cette incohérence, différentes approches ont été proposées, comme le modèle d'endommagement non-local [4], les approches à gradient [5, 6] ou les modèles type Cosserat [7]. Leur point commun est l'introduction d'une longueur interne, généralement constante, dans les lois constitutives contrôlant le processus

1. Ce papier représente un condensé de différents travaux menés avec de nombreux collaborateurs dont la liste complète est donnée dans la section *Remerciements*.

de rupture et empêchant tout phénomène dissipatif d'apparaître dans des régions matérielle à volume nulle permettant ainsi la régularisation du problème. Cependant, il a également été montré que ces modèles régularisés à longueur interne constante montrent encore différentes incohérences (e.g. [8]) et différents auteurs ont proposé des modèles où la longueur interne varie au cours de la rupture (e.g. [8, 9, 10, 11, 12]), les lois d'évolutions étant généralement arbitraires ou empiriques.

Des techniques numériques alternatives qui s'affranchissent de l'introduction d'une longueur interne par une représentation explicite des interactions induites par les hétérogénéités matérielles ont également été proposées [13, 14]. Si ces modèles sont trop gourmands en ressources informatiques pour être utilisés directement pour faire du calcul de structure à l'échelle industrielle, ils permettent une meilleure représentation du processus de rupture [14, 1] et, associés à des traitements statistiques utilisés en écologie spatiale [15], ils permettent de caractériser a posteriori l'évolution d'une longueur caractéristique à introduire dans les modèles d'endommagement régularisés utilisables dans un contexte industriel [16] (figure 1.c).

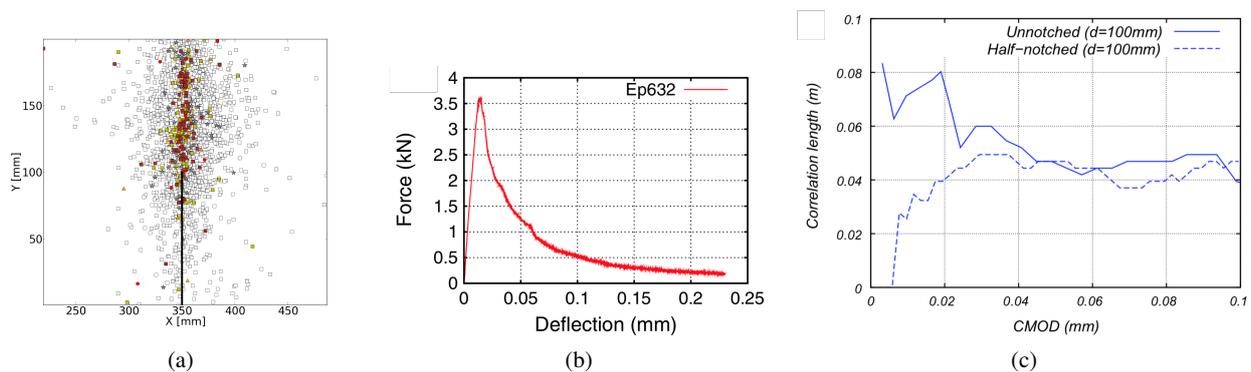


FIGURE 1 – (a) Événements acoustiques enregistrés durant la rupture d'une éprouvette en béton soumise à un chargement de flexion trois points (reproduit de [1]); (b) Réponse mécanique typique force-déflexion enregistrée durant le même type d'essai (reproduit de [2]); (c) Évolution d'une longueur caractéristique de la FPZ pour des éprouvettes entaillées et non-entaillées (reproduit de [16]).

L'article long présente les équations de base d'une formulation d'endommagement non-local à longueur interne constante ainsi qu'une stratégie expérimentale classique d'identification basée sur les effets d'échelle. Les lacunes de ce type de formulation vis à vis de la représentation cohérente d'un endommagement mécanique sont ensuite illustrées et des formulations alternatives s'affranchissant d'une longueur interne sont présentées. Les performances des différentes approches sont étudiées en utilisant des cas tests modèles et par comparaisons expérimentales. Enfin il est montré comment des approches statistiques couplées à des méthodes numériques représentant explicitement les hétérogénéités matérielles peuvent permettre l'identification de l'évolution d'une longueur interne à introduire dans un modèle non-local.

Remerciements

L'auteur est membre junior de l'*Institut Universitaire de France* et il remercie l'*Institut Pluridisciplinaire de Recherche Appliquée* (IPRA, FR CNRS-UPPA 2952) pour sa participation aux frais de conférences.

Les travaux présentés ont été menés avec différents collaborateurs et notamment :
 P. Grassl (*Univ. Glasgow*) ;
 L. Verdon, V. Lefort et Pr. Gilles Pijaudier-Cabot (*Univ Pau & Pays Adour*) ;
 J. Saliba, JP. Regoin et A. Loukili (*Centrale Nantes*).

Références

- [1] Grégoire D, Verdon L, Lefort V, Grassl P, Saliba J, Regoin JP, Loukili A, Pijaudier-Cabot G. Mesoscale analysis of failure in quasi-brittle materials : comparison between lattice model and acoustic emission data. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics* 2015 ; **39**(15) :1639–1664.
- [2] Grégoire D, Rojas-Solano LB, Pijaudier-cabot G. Failure and size effect for notched and unnotched concrete beams. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics* 2013 ; **37** :1434–1452.
- [3] Bazant ZP. Instability, ductility, and size effect in strain-softening concrete. *Journal of the Engineering Mechanics Division* 1976 ; **102**(2) :331–344.
- [4] Pijaudier-Cabot G, Bazant ZP. Nonlocal Damage Theory. *Journal of Engineering Mechanics* 1987 ; **113**(10) :1512–1533.
- [5] De Borst R, Mühlhaus HB. Gradient-dependent plasticity : Formulation and algorithmic aspects. *International Journal for Numerical Methods in Engineering* 1992 ; **35**(3) :521–539.
- [6] Peerlings R, De Borst R, Brekelmans W, De Vree J, Spee I. Some observations on localisation in non-local and gradient damage models. *European Journal of Mechanics - A/Solids* 1996 ; **15**(6) :937–953.
- [7] De Borst R. Simulation of strain localization : a reappraisal of the cosserat continuum. *Engineering computations* 1991 ; **8**(4) :317–332.
- [8] Grégoire D, Rojas-Solano LB, Pijaudier-cabot G. Continuum to discontinuum transition during failure in non-local damage models. *International Journal for Multiscale Computational Engineering* 2012 ; **10**(6).
- [9] Geers M, De Borst R, Brekelmans W, Peerlings R. Strain-based transient-gradient damage model for failure analyses. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering* 1998 ; **160**(1) :133–153.
- [10] Krayani A, Pijaudier-Cabot G, Dufour F. Boundary effect on weight function in nonlocal damage model. *Engineering Fracture Mechanics* 2009 ; **76**(14) :2217–2231.
- [11] Pijaudier-Cabot G, Dufour F. Non local damage model. Boundary and evolving boundary effects. *European Journal of Environmental and Civil engineering* 2010 ; **14**(6-7) :729–749.
- [12] Giry C, Dufour F, Mazars J. Stress-based nonlocal damage model. *International Journal of Solids and Structures* 2011 ; **48**(25-26) :3431–3443.
- [13] Grassl P, Grégoire D, Rojas Solano L, Pijaudier-Cabot G. Meso-scale modelling of the size effect on the fracture process zone of concrete. *International Journal of Solids and Structures* 2012 ; **49**(13) :1818–1827.
- [14] Rojas-Solano LB, Grégoire D, Pijaudier-cabot G. Interaction-based non-local damage model for failure in quasi-brittle materials. *Mechanics Research Communications* 2013 ; **54** :56–62.
- [15] Ripley BD. Modelling Spatial Patterns. *Journal of the Royal Statistical Society. Series B (Methodological)* 1977 ; **39**(2) :172–212.
- [16] Lefort V, Pijaudier-Cabot G, Grégoire D. Analysis by Ripley’s function of the correlations involved during failure in quasi-brittle materials : Experimental and numerical investigations at the mesoscale. *Engineering Fracture Mechanics* 2015 ; **147** :449–467.