



HAL
open science

Méthode Globale/Locale : Fissuration des Structures en Béton

Cécile Oliver Oliver-Leblond, Benjamin Richard, A. Delaplace, F. Ragueneau

► **To cite this version:**

Cécile Oliver Oliver-Leblond, Benjamin Richard, A. Delaplace, F. Ragueneau. Méthode Globale/Locale : Fissuration des Structures en Béton. 31ème rencontres universitaires de l'AUGC, May 2013, Cachan, France. hal-01692526

HAL Id: hal-01692526

<https://hal.science/hal-01692526>

Submitted on 25 Jan 2018

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Méthode Globale/Locale : Fissuration des Structures en Béton

C. Oliver-Leblond¹, B. Richard², A. Delaplace², F. Ragueneau¹

¹ LMT-Cachan (ENS Cachan / CNRS / UPMC / UniverSud Paris), 61 avenue du Président Wilson, F-94230 Cachan, France. Oliver@lmt.ens-cachan.fr

² CEA, DEN, DM2S, SEMT, Laboratoire d'Etudes de Mécanique Sismique, F-91191 Gif-sur-Yvette, France.

³ Lafarge Centre de Recherche, 95 rue Montmurier, F-38291 Saint Quentin Fallavier, France.

RÉSUMÉ. Une nouvelle approche globale/locale est mise en place pour l'étude de la fissuration des structures en béton et béton armé. Dans un premier temps, une analyse globale de la structure à l'aide d'une approche éléments finis basée sur la mécanique de l'endommagement est réalisée. Une réanalyse des zones endommagées à l'aide d'un modèle éléments discrets type lattice est effectué à l'échelle local. Ce post-traitement non-intrusif permet d'obtenir des informations fines sur les fissures – ouverture, longueur, rugosité – apparaissant dans les structures de grandes tailles avec un coût de calcul raisonnable. Des illustrations 2D et 3D de la méthode sont présentées.

ABSTRACT. A new global/local approach has been developed to study the cracking of concrete and reinforced concrete structures. First, a global analysis of the structure is performed with a finite element model based on damage mechanics. Then, a reanalysis of the damaged zones is realised at the local scale with a lattice model. This non-intrusive post-treatment allows a fine description of cracking – opening, length, rugosity – in large scale structures with a reasonable computation cost. 2D and 3D illustrations are treated.

MOTS-CLÉS : Damage ; Cracking ; Discrete Element Method ; Continuous Approach.

KEYWORDS: Endommagement, Fissuration, Méthode des Eléments discrets, Approches Continues.

1. Introduction

La durabilité d'une structure est définie comme sa capacité à remplir ses fonctions jusqu'à la fin de sa durée de vie et ce pour un coût de maintenance minimal. Dans le cas de structures en béton ou béton armé, il est reconnu que la prédiction de leur durabilité est fortement liée à la qualité de prédiction des dégradations – la fissuration en particulier.

Pour cette raison, des outils numériques sont développés pour estimer les caractéristiques des fissures – initiation, emplacement, propagation, ouverture, tortuosité et rugosité – apparaissant sur les structures en béton ou béton armé.

Les lois constitutives fondées sur la mécanique de l'endommagement [MAZ 84, SIM 87, DES 07] sont capables de représenter le phénomène de rupture de structures en béton et béton armé. De plus, ils sont largement utilisés par les ingénieurs car ils sont robustes et disponibles dans plusieurs codes de calcul commercialisés. En revanche, la fissuration est vue comme la conséquence ultime d'une diminution continue des propriétés élastiques du matériau et est représentée de manière diffuse du fait du caractère continu de la cinématique choisie. Ces lois ne permettent donc pas directement d'accéder à des informations fines sur les fissures – comme leur ouverture – sans post-traitement [DUF 08, MAT 10].

Une alternative à ces approches continues est l'utilisation des modèles discrets [CUN 79, ADD 02]. Ces derniers reproduisent explicitement les discontinuités cinématiques et les caractéristiques de la fissuration propres des matériaux fragiles et quasi fragiles sont correctement représentés. Cependant, le nombre d'éléments discrets qui doit être mis en oeuvre pour une telle modélisation rend très prohibitif le coût de calcul dans le cas de structures de grandes tailles.

Afin d'utiliser les avantages propres aux approches continues et discrètes, une méthode de couplage est proposée. Cette technique globale/locale est fondée sur les techniques dites de *sub-modeling* ou de *zoom* [KEL 82, VOL 95]. Elle consiste en une modélisation non-linéaire continue de l'ensemble de la structure et d'une réanalyse discrète des zones fissurées, préalablement identifiée via le champ d'endommagement.

Les résultats numériques seront confrontés à deux études expérimentales. La première est une analyse 2D d'une poutre en béton de petite taille soumise à de la flexion trois points. La seconde est une analyse 3D et réanalyse d'une tranche d'une poutre en béton armé de taille industrielle soumise à de la flexion quatre points testée dans le cadre du projet national CEOS.fr. La prédiction numérique de la fissuration sera confrontée à sa caractérisation expérimentale obtenue par corrélation d'images.

2. La Méthode Globale/Locale

2.1. Idée générale

La méthode globale/locale [OLI 13] est composée des étapes suivantes :

- **Analyse globale** de l'ensemble de la structure à l'aide d'un modèle éléments finis basé sur la mécanique de l'endommagement ;
- **Découpe de la RoI**, région de concentration d'endommagement ;
- **Extraction et interpolation des déplacements** du maillage global vers le maillage local ;
- **Ré-analyse locale** de la RoI à l'aide d'un modèle à éléments discrets type *lattice*.

Les différentes étapes sont résumées sur la figure 1.

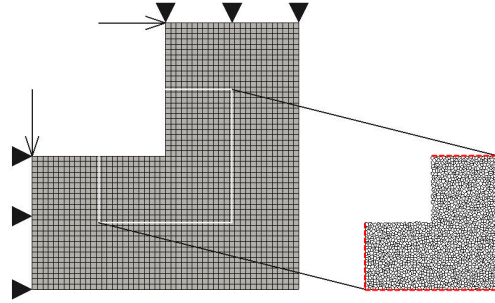


Figure 1. Illustration de la méthode Globale/Locale sur une éprouvette en L

2.2. Le Modèle Global

Le modèle utilisé à l'échelle global est un modèle éléments finis couplant élasticité, endommagement isotropique and glissement internes [RIC 10]. Le potentiel d'état est donné par l'énergie libre d'Helmholtz :

$$\begin{aligned} \rho\Psi = & \frac{\kappa}{6}((1-d) \langle \epsilon_{kk} \rangle_+^2 + \langle \epsilon_{kk} \rangle_-^2) \\ & + \mu(1-d)\epsilon_{ij}^d\epsilon_{ij}^d + \mu d(\epsilon_{ij}^d - \epsilon_{ij}^\pi)(\epsilon_{ij}^d - \epsilon_{ij}^\pi) \\ & + \frac{\gamma}{2}\alpha_{ij}\alpha_{ij} + H(z) \end{aligned} \quad [1]$$

avec ρ la densité, Ψ l'énergie libre d'Helmholtz, d l'endommagement scalaire variant de 0 (matériau sain) à 1 (matériau fissuré), ϵ_{ij} le tenseur des déformations totales, ϵ_{ij}^π le tenseur des déformations de glissement, α_{ij} le tenseur d'écrouissage cinématique, z la variable d'écrouissage isotrope, H la fonction de consolidation, κ le coefficient de bulk, μ le module de cisaillement et γ un paramètre d'écrouissage cinématique. $\langle . \rangle_+$ et $\langle . \rangle_-$ correspondent aux parties positives et parties négatives de $(.)$ respectively. $(.)^d$ est la partie déviatorique de $(.)$ définie comme $(.)^d = (.) - \frac{1}{3}(.)_{kk}$.

Ce modèle peut décrire les mécanismes locaux propres au béton comme la dissymétrie traction/compression, les déformations inélastiques ou l'effet unilatéral. De plus, il est robuste et peut gérer des cas tests sur des structures de grandes tailles.

Cependant, il requiert l'introduction d'une longueur caractéristique afin d'empêcher la dépendance des résultats au maillage. Ici, la régularisation est assurée grâce à la technique non-local intégrale [PIJ 09]. Le taux d'énergie dissipé est moyenné sur $\Omega(\mathbf{x}, l_c)$ et exprimé comme :

$$\tilde{Y}(\mathbf{x}) = \frac{\int_{\Omega(\mathbf{x}, l_c)} \bar{Y}(\mathbf{s}) \Lambda(\mathbf{x} - \mathbf{s}) ds}{\int_{\Omega(\mathbf{x}, l_c)} \Lambda(\mathbf{x} - \mathbf{s}) ds} \quad [2]$$

avec \mathbf{x} le point de Gauss courant et l_c la longueur caractéristique et Λ la distribution Gaussienne.

Cette méthode de régularisation va étaler la zone d'endommagement et ainsi rendre l'étude de la fissure complexe sans méthode de post-traitement.

2.3. Le Modèle Local

Le modèle local est un modèle éléments discrets de type modèle *lattice* [DEL07]. Il est constitué d'un ensemble de particules de Voronoi reliées entre elles par des poutres d'Euler-Bernoulli représentant la cohésion du béton. Le comportement quasi-fragile du béton est retrouvé en imposant un comportement fragile aux poutres.

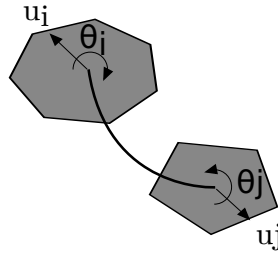


Figure 2. Poutre Euler-Bernoulli reliant deux particules dans un état déformé.

Le critère de rupture P_{ij} de la poutre $i - j$ dépend de la déformation axiale ϵ_{ij} et de la rotation des particules liées à la poutre θ_i and θ_j (voir figure 2). I est exprimé comme :

$$P_{ij} = \left(\frac{\epsilon_{ij}}{\epsilon_{ij}^{cr}} \right)^2 + \frac{|\theta_i - \theta_j|}{\theta_{ij}^{cr}} > 1 \quad [3]$$

La déformation critique ϵ_{ij}^{cr} et la rotation critique θ_{ij}^{cr} de la poutre $i - j$ est générée via une distribution de Weibull [VAN 02].

Ce modèle donne une information complète sur la fissuration. Malheureusement, les cas tests sur des structures de tailles importantes ne sont pas réalisables à cause des temps de calcul.

3. Applications

3.1. Analyse 2D d'une poutre en béton

Une campagne d'essais sur des poutres entaillées sous un chargement de flexion trois points a été menée en accord avec les recommandations de la RILEM [RIL 85]. Les éprouvettes sont des poutres de section carré de hauteur $D = 70$ mm, de longueur $4D$ et de hauteur d'entaille $D/2$.

La méthode de corrélation d'image [HIL 08] a été utilisée pour mesurer les informations sur la fissuration – propagation, longueur, ouverture – à partir du champ de déplacement expérimental.

Le maillage global utilisé est présenté sur la figure 3 à gauche. La zone centrale est choisie comme zone d'intérêts et le maillage local sur cette zone apparaît sur la figure 3 à droite. Les lignes rouges font apparaître les zones d'application des conditions aux limites.

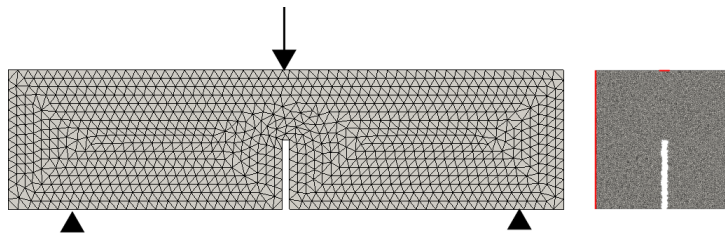


Figure 3. Maillage local

La courbe force-flèche numérique obtenue grâce à l'analyse globale est comparée aux résultats expérimentaux (voir figure 4). On remarque que non seulement la valeur au pic mais aussi le comportement post-pic sont reproduits.

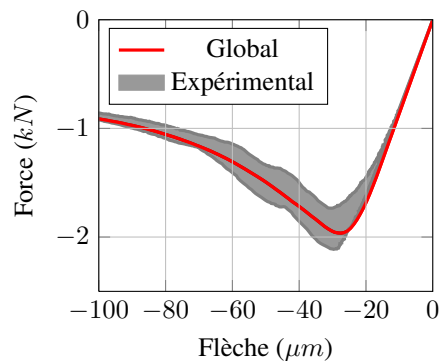


Figure 4. Comparaison des courbes force-flèche numérique et expérimentales.

Grâce à la ré-analyse locale, nous avons accès à des informations numériques fines sur la fissure. Le faciès de fissuration obtenu grâce au modèle discret est proche de celui observé expérimentalement (voir figure 5).

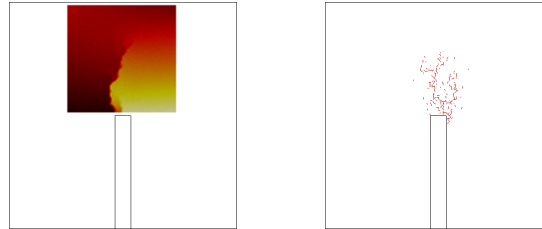


Figure 5. *Faciès de fissuration expérimental (à gauche) et numérique (à droite) issu de la réanalyse discrète*

Si on compare l'évolution de l'ouverture de fissure en fonction de la hauteur dans la poutre (voir figure 6), nous pouvons conclure que l'analyse globale/locale est adaptée à la modélisation de la propagation de fissure dans du béton.

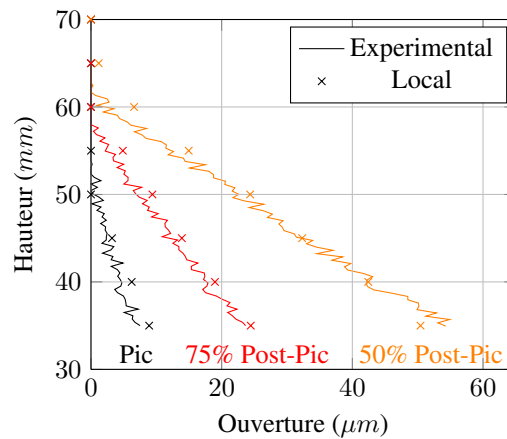


Figure 6. *Evolution de l'ouverture de fissure dans la poutre pour plusieurs pas de chargement.*

3.2. Analyse 3D d'une poutre en béton armé

Dans le cadre du projet CEOS.fr et de l'ANR MEFISTO, une poutre en béton armé de 1.6m de large, 0.8m de profondeur et 6.1m de long a été testé sous un chargement de flexion quatre points. Le spécimen ayant une profondeur importante, les effets 3D ne semblent pas négligeables. Ainsi, une analyse globale 3D du spécimen a été réalisée.

La figure 7 présente le maillage du quart de la cage d'armature avec des éléments 3D pour les aciers longitudinaux et des éléments barres pour les cadres.

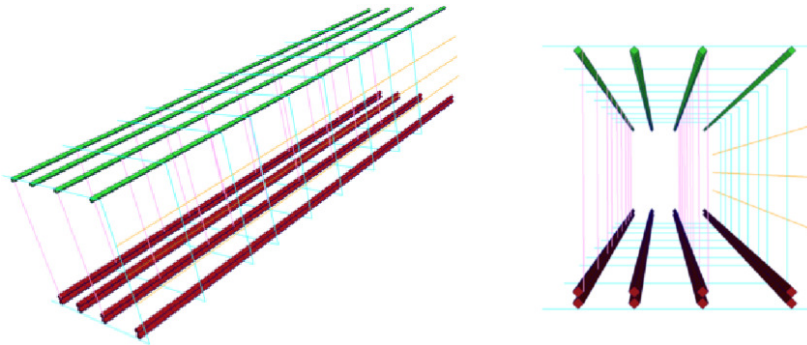


Figure 7. Maillage de la cage d'armature 3D.

D'après la figure 8, le comportement global de la poutre en béton armée a été reproduit. En effet, il y a peu d'écart entre la courbe force-flèche expérimentale et celle numérique obtenue à l'aide d'un calcul global.

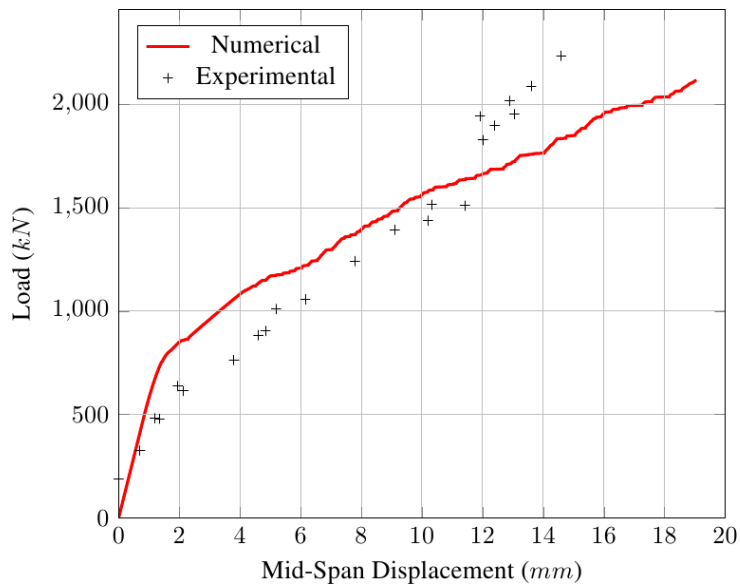


Figure 8. Comparaison des courbes force-flèche numérique et expérimental.

Le faciès d'endommagement obtenu après l'analyse globale est présenté sur la figure 9.

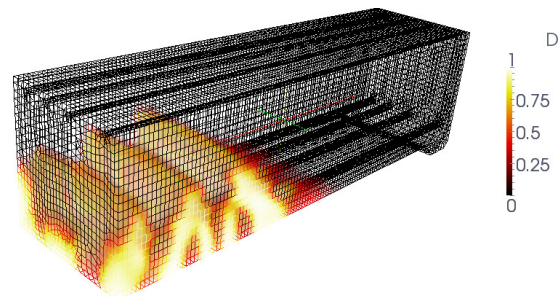


Figure 9. *Faciès d'endommagement global*

Plusieurs zones d'endommagement distinctes apparaissent et une d'entre elles est réanalysé grâce au modèle discret. Nous pouvons noter un bon accord entre la zone d'endommagement global et la fissure locale.

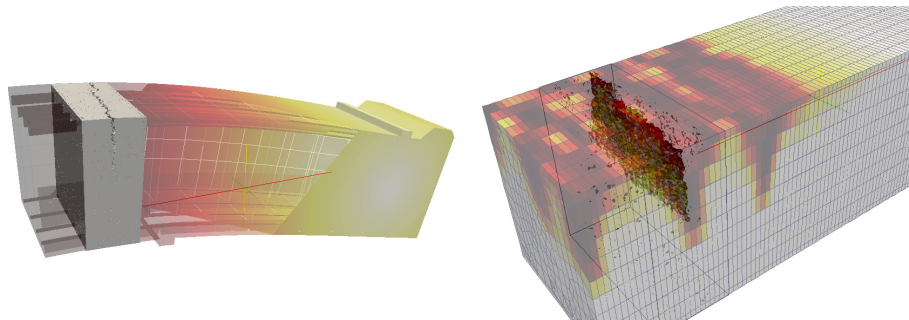


Figure 10. *Fissuration locale*

4. Conclusions

Une stratégie globale/locale non-intrusive a été présentée.

L'utilisation adaptée d'un modèle global basé sur la mécanique de l'endommagement et d'un modèle local de type modèle *lattice* permet l'extraction fine de la fissuration des structures en béton et béton armé.

La faisabilité de l'approche a été illustrée sur des exemples 2D et 3D. Les comparaisons avec des résultats expérimentaux – bénéficiant de la technique de corrélation d'image – a permis une validation non seulement en terme de comportement global mais aussi en terme d'évolution locale des caractéristiques de la fissuration.

5. Bibliographie

- CUNDALL, P. A., STRACK, O. D. L., « A discrete numerical model for granular assemblies », *Geotechnique*, vol. 29, 1979, p. 47-60.
- D'ADDETTA, G. A., KUN, F., RAMM, E., « On the application of a discrete model to the fracture process of cohesive granular materials », *Granular Matter*, vol. 4, 2002, p. 77-90.
- DELAPLACE, A., DESMORAT, R., « Discrete 3D model as complimentary numerical testing for anisotropic damage », *Int. J. Fract.*, vol. 148, 2007, p. 115-128.
- DESMORAT, R., GATUINGT, F., RAGUENEAU, F., « Nonlocal anisotropic damage model and related computational aspects for quasi-brittle materials », *Engineering Fracture Mechanics*, vol. 74, n° 10, 2007, p. 1539-1560.
- DUFOUR, F., PIJAUDIER-CABOT, G., CHOINSKA, M., HUERTA, A., « Extraction of a crack opening form a continuous approach using regularized damage models », *Computers and Concrete*, vol. 5, n° 4, 2008, p. 375-388.
- HILD, F., ROUX, S., « CorreliQ4 : A software for "finite-element" displacement field measurements by digital image correlation », *Rapport interne du LMT-Cachan*, vol. 269, 2008.
- KELLEY, F. S., « Mesh requirements for the analysis of a stress concentration by the specified boundary displacement method », *Proceedings of the Second International Computers in Engineering Conference, ASME*, 1982.
- MATALLAH, M., LA BORDERIE, C., MAUREL, O., « A practical method to estimate crack openings in concrete structures », *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, vol. 34, 2010, p. 1615-1633.
- MAZARS, J., LA BORDERIE, C., MAUREL, O., « Application de la mécanique de l'endommagement au comportement non linéaire et à la rupture du béton de structure », *Thèse de doctorat d'état de l'Université Paris VI*, 1984.
- OLIVER-LEBLOND, C., DELAPLACE, A., RAGUENEAU, F., RICHARD, B., « Non-intrusive global/local analysis for the study of fine cracking », *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 2013.
- PIJAUDIER-CABOT, G., BAZANT, Z., « Nonlocal damage theory », *Journal of Engineering Mechanics*, vol. 1113, 1987, p. 1512-1533.
- RICHARD, B., RAGUENEAU, F., CREMONA, C., ADELAIDE, L., « Isotropic continuum damage mechanics for concrete under cyclic loading : Stiffness recovery, inelastic strains and frictional sliding », *Engineering Fracture Mechanics*, vol. 77, n° 8, 2010, p. 1203-1223.
- RILEM, TC-50 FMC, « Determination of the fracture energy of mortar and concrete by means of three-point bend tests on notched beams », *Mater. Struct.*, vol. 18, n° 106, 1985, p. 285-290.
- SIMO, J., JU, J., « Strain and stress based continuum damage models formulation », *Int. J. Solids Struct.*, vol. 23, 1987, p. 821-840.
- VAN MIER, J.G.M., VAN VLIET, M.R.A., WANG, T.K., « Fracture mechanisms in particle composites : statistical aspects in lattice type analysis », *Mech. Mater.*, vol. 34, 2002, p. 705-724.
- VOLETI, S.R., CHANDRA, N., MILLER, J.R., « Global-local analysis of large-scale composite structures using finite element methods », *Comp. Struct.*, vol. 58, n° 3, 1995, p. 453-464.