HAL
open science

Endommagement et fissuration du béton armé : passage continu – discret

Cedric Giry, Marina Bottoni, Frédéric Dufour, Panagiotis Kotronis, Jacky Mazars

To cite this version:

Cedric Giry, Marina Bottoni, Frédéric Dufour, Panagiotis Kotronis, Jacky Mazars. Endommagement et fissuration du béton armé : passage continu – discret. CFM'09, XIXème congrès français de Mécanique, Aug 2009, Marseille, France. hal-00364373

HAL Id: hal-00364373

https://hal.science/hal-00364373

Submitted on 4 Nov 2019

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.

Endommagement et fissuration du béton armé : passage continu - discret

C. GIRY[a], M. BOTTONI[a], F. DUFOUR[a], P. KOTRONIS[a], J. MAZARS[a]

a. Laboratoire 3S-R (Sols, Solides, Structures-Risques), INPG/UJF/CNRS, Domaine Universitaire, BP 53, 38041 Grenoble cedex 9, France

Résumé :

Cet article présente les travaux effectués sur la modélisation d'un tirant en béton armé dans le cadre du benchmark CEOS.fr (Comportement et Evaluation des Ouvrages Spéciaux Fissuration-Retrait) "statique monotone" . A partir du modèle d'endommagement Mazars formulé en non-local pour le béton et d'un modèle élasto-plastique pour les armatures, nous avons suivi l'évolution du comportement non-linéaire de cet élément de structure. Le comportement global force déplacement est bien reproduit. De plus, les informations au niveau local sont données par les faciès d'endommagement observés et les ouvertures de fissures par une méthode de post-traitement.

Abstract :

This article deals with the modelling of a reinforced concrete tie-beam in the framework of the benchmark CEOS.fr (Comportement et Evaluation des Ouvrages Spéciaux Fissuration-Retrait) "statique monotone". Using the damage model Mazars in a nonlocal formulation for concrete and an elastoplastic model for the reinforcement, we reproduce the nonlinear behavior of this structural element. The global behavior, described through the evolution of the force versus the displacement, is well simulated. Local information are given via the damage field and the evolution of the opening of cracks using a post-treatment method.

Mots clefs : béton armé, endommagement, non-local, ouverture de fissures

1 Introduction

Face aux enjeux qui se présentent dans le domaine du Génie Civil tels que la surêté des installations nucléaires et la durabilité des structures en béton armé, des analyses sont menées sur des problèmes de fuite de liquide ou de gaz à travers le béton ou bien encore la pénétration d'agents agressifs... Avant de pouvoir effectuer de telles études, il est nécessaire de connaître le comportement des matériaux que l'on utilise et leur évolution au cours du temps suivant les sollicitations auxquelles ils sont soumis. L'étude de la fissuration du béton est un point clé dans cette optique.
A l'heure actuelle, des codes (EUROCODES, CEB...) proposent des formules semi-empiriques pour permettre à l'ingénieur d'obtenir des informations sur la fissuration. Néanmoins, ces formules montrent leurs limites dans le cas de structures exceptionnelles et il semble nécessaire de mener une étude plus approfondie de ces problémes.
Dans ce cadre là, le projet national CEOS.fr a été mis en place afin d'effectuer un état de l'art dans ce domaine et mettre ainsi en lumière les outils à disposition et les points à approfondir. Différents domaines d'études ont été proposés dans ce benchmark (fissuration sous chargement statique monotone, sous chargement dynamique et cyclique, comportement sous gradients thermo-hydriques). Cet article présente une partie des travaux effectués sur la modélisation de tirants en béton armé testés dans le cadre de la thèse de P. Mivelaz [1].
La première partie présente l'essai étudié ainsi que le modèle numérique et la seconde partie donne les résultats obtenus concernant le comportement global et local. Les résultats obtenus vis à vis de la fissuration (ouverture de fissure) seront notamment donnés à partir d'une méthode de post-traitement du calcul non-linéaire.

2 Présentation de l'essai et du modèle numérique

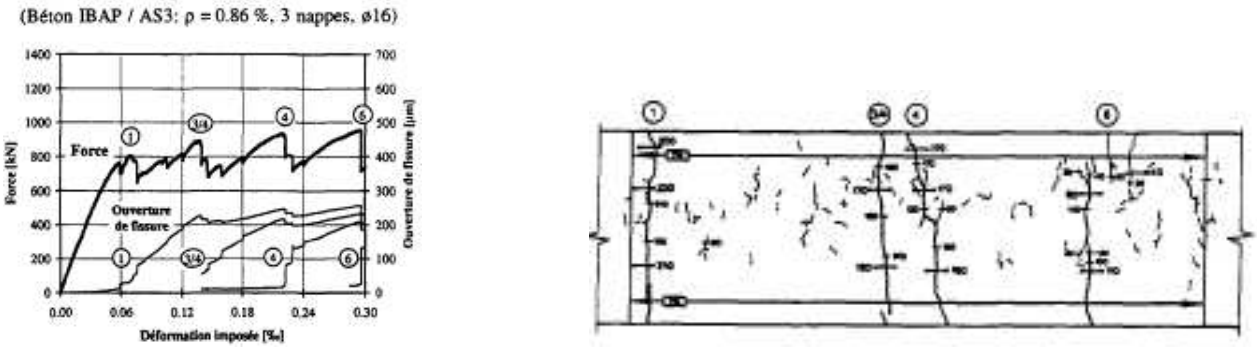
2.1 Présentation de l'essai

L'essai sur lequel porte notre étude est extrait des travaux effectués par Pierre Mivelaz dans le cadre de sa thèse ayant pour objet la détermination du débit d'air à travers des fuites engendrées par des sollicitations mécaniques dans des tirants en béton armé. Plusieurs tirants de 5m de longueur, 1m de hauteur et 0,42m d'épaisseur avec des taux de renforcement et deux bétons différents ont été testés. Dans notre étude, nous nous limiterons à

un tirant en béton armé. La section du tirant et la répartition du ferraillage dans le tirant sont données sur la figure 1.

FIG. 1 – Repartition des aciers dans le tirant

Le tirant est soumis à un déplacement imposé par l'intermédiaire d'un système de barres Dywidag. Les résultats obtenus expérimentalement sont donnés sur la figure 2. Les repères 1, 3/4, 4 et 5 correspondent aux différentes



(a) Force et ouverture de fissure en fonction de la déformation imposée

(b) Faciès de fissuration pour une déformation de 0,3 $^0/_{00}$

FIG. 2 – Résultats expérimentaux

fissures qui apparaissent au cours de l'essai jusqu'à une déformation imposée de 0,3 $^0/_{00}$. On observe une répartition aléatoire de ces fissures. En mettant en parallèle l'évolution de la force et l'ouverture de fissure, on observe bien, pour une fissure qui apparaît, une chute au niveau de la force et une augmentation de l'ouverture mesurée de cette fissure. Les zones fissurées déjà présentes sont affectées par celle-ci en se déchargeant (diminution de l'ouverture).

2.2 Modèle numérique

Les calculs présentés dans cet article ont été menés en 2D (contraintes planes) à l'aide du code éléments finis Cast3M [2] développé par le Commissariat à l'Energie Atomique. Le maillage du tirant est composé d'éléments linéaires pour le béton (0,03 m x 0,03 m) et d'éléments barres linéaires pour les armatures (0,03 m). Les cadres ne sont pas reproduits dans notre modélisation 2D. On suppose une adhérence parfaite entre les éléments d'acier et les éléments de béton.
Nous avons utilisé le modèle d'endommagement Mazars [3] en formulation non-local intégrale [4] et [5] pour le béton.
Relation contrainte - déformation :

$$\boldsymbol{\sigma} = (1 - D)\mathbf{C} : \boldsymbol{\varepsilon} \tag{1}$$

D est la variable scalaire d'endommagement. **C** est le tenseur élastique de rigidité.
Combinaison de l'endommagement :

$$D = \alpha_t^\beta D_t + \alpha_c^\beta D_c \tag{2}$$

D_c, D_t correspondent respectivement à l'endommagement dû à la compression et à la traction.
Les facteurs de pondération α_c et α_t dépendent du tenseur des déformations.β est un facteur de correction pour

prendre en compte l'effet du cisaillement.
Evolution de l'endommagement :

$$D_{c,t} = 1 - \frac{\varepsilon_{D0}(1 - A_{c,t})}{\tilde{\varepsilon}} - A_{c,t}.\exp[-B_{c,t}(\tilde{\varepsilon} - \varepsilon_{D0})] \tag{3}$$

A_t et B_t sont des paramètres du modèle contrôlant l'évolution de l'endommagement dû à la traction et A_c et B_c l'endommagement dû à la compression.ε_{D0} correspond au seuil de déformation pour la traction.

$$\tilde{\varepsilon} = \max_t(\tilde{\varepsilon}, \bar{\varepsilon}_{eq}) \tag{4}$$

avec $\tilde{\varepsilon} = \varepsilon_{D0}$ initialement et avec la déformation équivalente moyenne (régularisation non-local intégrale) $\bar{\varepsilon}_{eq}$ obtenue par les formules suivantes :

$$\varepsilon_{eq} = \sqrt{\sum_{i=1}^{3} < \varepsilon_i >_+^2} \tag{5}$$

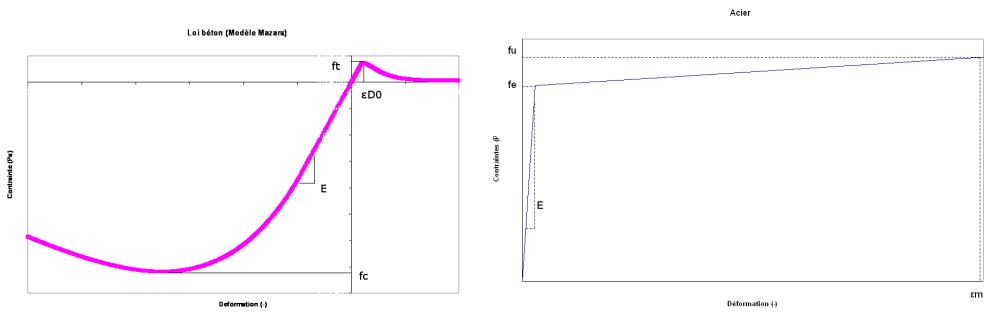
où $< \varepsilon_i >_+$ définit la partie positive des déformations principales.

$$\bar{\varepsilon}_{eq} = \frac{\int_\Omega \phi(\boldsymbol{x} - \boldsymbol{s})\varepsilon_{eq}(\boldsymbol{s})dv}{\int_\Omega \phi(\boldsymbol{x} - \boldsymbol{s})dv} \tag{6}$$

La fonction poids est une fonction Gaussienne de la forme :

$$\phi(\boldsymbol{x} - \boldsymbol{s}) = \exp\left(-\left(2\frac{\|\boldsymbol{x} - \boldsymbol{s}\|}{l_c}\right)^2\right) \tag{7}$$

où l_c est la longueur interne du modèle non-local.
Nous avons utilisé pour l'acier un modèle élasto-plastique définie par une courbe bilinéaire. Les différents paramètres sont définis sur la figure 3.
Les caractéristiques fournies pour cet essai sont donnés dans le tableau 1. Les trois colonnes donnent res-



(a) béton (b) acier

FIG. 3 – Lois matériaux

pectivement, les paramètres matériaux obtenus à partir d'essais, les paramètres des modèles correspondant aux parmètres matériaux et les paramètres calibrés par rapport à l'essai sur tirant. Les différents ajustements sont analysés juste après.

- Seuls les 3 m centraux du tirant ont été instrumentés expérimentalement. De plus, il a été montré [6] que le troncage effectué pour traiter les bords libres en régularisation non-local entraînait une " attirance " de l'endommagement par les bords. Pour éviter ce problème, 2 zones élastiques de 20 cm de longueur, possédant les mêmes propriétés que la zone centrale de 3 m mais ne pouvant s'endommager, ont été mises en place. La connectivité (matrice prenant en compte l'influence des points de Gauss dans le voisinage du point de Gauss considéré) est alors calculée à partir de la zone centrale complétée de ces 2 zones élastiques évitant ainsi d'avoir des répartitions gaussiennes tronquées pour les éléments aux extrémités.
- La valeur de la résistance en traction fournie par l'essai de fendage est supérieure à celle que l'on peut déduire de l'essai sur tirant comme indiqué dans la thèse [1]. Si l'on exclut les erreurs dues à l'expérimentation lors de l'essai de fendage, deux raisons peuvent expliquer ces différences. Le champs de contrainte dans un essai de fendage n'est pas homogène et va donc imposer le lieu de la fissuration. Au contraire, dans le cas

Paramètres matériaux		Paramètres non calibrés		Paramètres calibrés	
Béton		Béton		Béton	
E = 33,4 GPa f_c = 41,8 MPa	ν = 0,2 f_t = 3,15 MPa	A_t = 0,9 A_c = 0,85 β = 1,06	B_t = 10000 B_c = 1010 ε_{D0} = 9,43.10^{-5}	A_t = 0,9 A_c = 0,85 β = 1,06	B_t = 10000 B_c = 1010 ε_{D0} moyenne : 4,2.10^{-5} écart type : 1,5.10^{-5}
Acier		Acier		Acier	
E = 200 GPa f_e = 565 MPa ε_m = 10%	ν = 0,3 f_u = 647 MPa	E = 200 GPa f_e = 565 MPa ε_m = 10%	ν = 0,3 f_u = 647 MPa	E = 200 GPa f_e = 565 MPa ε_m = 10%	ν = 0,3 f_u = 647 MPa

TAB. 1 – Paramètres matériaux

de notre essai, le tirant est sollicité de façon homogène et le lieu de la fissuration est piloté par les points faibles du matériau et entraîne un effet d'échelle de type Weibull. De plus, au regard des dimensions d'une éprouvette de béton pour un essai de fendage et celles du tirant, il y a également un effet d'échelle matériau qui intervient. Par conséquent, la valeur du paramètre ε_{D0} a été diminuée à 4,2.10^{-5} afin d'obtenir un effort au niveau de la première fissure équivalent à celui obtenu expérimentalement.

– Par ailleurs, nous avons observé un phénomène de " snap-back " très important lors de la localisation de la déformation. L'utilisation d'un pilotage en déplacement ne nous permettait pas de bien capter l'évolution de l'état de notre tirant lors de ce phénomène. Afin de passer au mieux ces phases, un pilotage en longueur d'arc [7] est choisi pour suivre au plus près l'évolution des variables internes pour le second calcul.
– Nous avons observé que l'endommagement était homogène dans notre tirant, jusqu'à ce qu'une localisation apparaisse tardivement, déclenchée sans doute par le bruit numérique. Afin d'éviter de dépendre d'un bruit numérique pour amorcer une localisation, des éléments faibles reproduisant les aléas de résistances locales dans le béton, pouvaient être introduits. Sur les résultats expérimentaux, on constate que l'effort évolue de façon non-linéaire juste avant d'obtenir la première fissure. De plus, les premières fissures sont distribuées de manière aléatoire le long du tirant traduisant le caractère hétérogène du béton. Cette observation nous a amené à choisir une répartition aléatoire d'un paramètre du modèle béton (ε_{D0}). La répartition suit une distribution gaussienne non corrélée. Cette répartition est tronquée (les valeurs trop faibles seront remplacées par une valeur minimale de 1.10^{-5}) car ce paramètre correspond à la déformation à la première fissuration en traction. La valeur moyenne de cette distribution correspondra à la valeur pour la première fissure observée expérimentalement sur le tirant. On peut, avec ce choix, reproduire l'endommagement progressif jusqu'à la première fissure et observer une répartition aléatoire des premières fissures.
– Dans un premier temps, la longueur caractéristique avait été prise égale à 9,6 cm (3 fois la taille du plus gros granulat [4]). Sachant que les efforts sont redistribués des armatures au béton par cisaillement de l'interface, le choix d'une longueur caractéristique aussi élevée (de l'ordre de l'espacement entre armatures longitudinales) entraînait une redistribution des déformations localisées sur une zone trop importante par régularisation et conduisait simplement à un élargissement progressif de la zone endommagée. Afin d'observer plusieurs zones endommagées distinctes et par la suite extraire des informations pour calculer des ouvertures de fissures, la longueur caractéristique est diminuée et ramenée à une fois la taille du plus gros granulat (0,032 m).

3 Résultats et analyse de la fissuration

Cette partie présente certains résultats obtenus numériquement. On peut observer sur la figure 4, un endommagement progressif avant la première fissure entrainant une diminution de la raideur tangente. Cette phase est également observée expérimentalement. L'utilisation du pilotage en longueur d'arc permet de passer au mieux les ruptures fragiles observées. Les fissures successives apparaissent en suivant les défauts du matériau, puis, à travers la diffusion de l'effort des armatures dans le béton. Après avoir endommagé complètement le béton, la courbe évolue en suivant le comportement des armatures longitudinales.

La figure 5 donne l'endommagement pour une déformation imposée de 0,3 $^0/_{00}$. La méthode pour obtenir des informations sur la fissuration à partir d'un tel résultat a été développée comme un post-traitement du calcul de l'endommagement de la structure en béton. L'analyse se passe en deux étapes. Dans un premier temps, la position de la fissure est trouvée à partir de la résolution d'un problème en Laplacien basé sur les

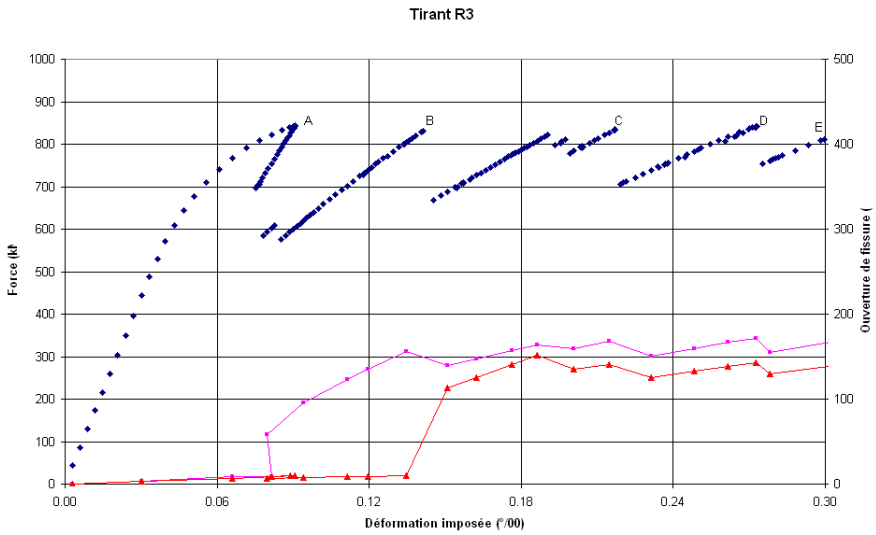


FIG. 4 – Evolution de la force (en bleu) et de l'ouverture des 2 premières fissures (en rouge) en fonction de la déformation imposée

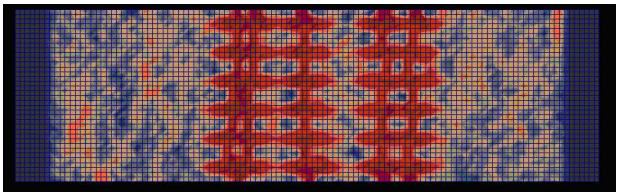


FIG. 5 – Endommagement du béton dans le tirant R3 pour une déformation de 0,3 $^0/_{00}$

déformations principales positives [8]. Puis, l'ouverture est calculée en plusieurs points de la fissure selon une approche 1D [9]. Le champ de déformations équivalentes obtenu par le calcul non-linéaire est comparé au champ de déformations équivalentes correspondant à un saut de déplacement au droit de la fissure (discontinuité forte). Ces deux champs sont considérés égaux au droit de la fissure. A partir de cette hypothèse, le saut de déplacement est estimé.
Suivant cette méthode, la figure 4 donne en plus de l'évolution de la force, l'ouverture de fissure moyenne en fonction de la déformation imposée. Ces deux paramètres sont représentés sur la même courbe afin d'analyser l'évolution du comportement de notre tirant au cours de l'essai. La figure 6 donne l'évolution de l'ouverture de fissure sur la hauteur du tirant au cours de l'essai. On remarque sur cette répartition que l'on passe par des valeurs minimum correspondant aux lieux des armatures. Celles-ci ont effectivement tendance à limiter l'ouverture de fissure.
Les deux courbes d'ouverture de fissure correspondent aux deux premières fissures observées lors du calcul. Le comportement observé expérimentalement est bien reproduit. Les valeurs moyennes sont légèrement inférieures aux valeurs mesurées expérimentalement. On peut cependant remarquer que les valeurs maximales que nous obtenons correspondent aux mesures. De plus, nous avons considéré une adhérence parfaite entre l'acier et le béton. La mise en place d'éléments d'interface permettra sans doute d'obtenir une ouverture de fissure à ces endroits légérement plus grande et donc réhausser la valeur moyenne pour se rapprocher de la valeur expérimentale. Finalement, la valeur de A_t utilisée pour le modèle béton est inférieure à 1 amenant une contrainte résiduelle dans le béton non nulle au niveau de la zone endommagée qui tend à limiter l'ouverture des fissures.

4 Conclusion

Cet article présente les résultats obtenus sur la modélisation d'un tirant en béton armé soumis à un chargement statique monotone. Le comportement global caractérisé par l'évolution de la force en fonction du déplacement est bien reproduit. Dans une moindre mesure, le comportement local est proche des résultats expérimentaux, que ce soit pour l'endommagement ou pour l'ouverture de fissure. Nous montrons que la méthode de post-traitement permet de calculer une ouverture de fissure point par point. Cependant, certaines limites sont at-

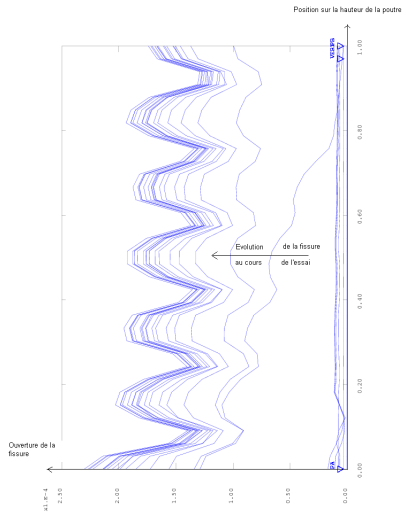


FIG. 6 – Répartition de l'ouverture de la 1ère fissure sur la hauteur du tirant au cours de l'essai (chaque courbe correspond à une situation de chargement donné)

teintes pour ces calculs et des ajustements sont faits et des améliorations restent encore à faire. Le cas test montre clairement que les données extraites pour caractériser le béton ne peuvent pas être utilisées directement pour effectuer un calcul de structure. Il est nécessaire d'adapter ces valeurs pour prendre notamment en compte l'effet d'échelle de type Weibull et l'effet d'échelle matériau. L'essai sur tirant représente une difficulté numérique du fait de l'homogénéité des sollicitations. En s'inspirant des idées développées sur les modèles mésoscopiques, la distribution aléatoire d'un des paramètres caractérisant le béton semble pouvoir reproduire la localisation aléatoire des premières fissures. Des améliorations restent encore à faire notamment sur la valeur de l'écart type. L'utilisation d'une méthode de régularisation est nécessaire pour nos calculs afin d'éviter la dépendance au maillage des résultats et avoir la bonne largeur de la zone de propagation de la fracture. Le modèle non-local nous permet de répondre à ce problème. Néanmoins, certaines difficultés et certaines limites apparaissent à travers les essais réalisés. Les bords libres et les zones endommagées sont des zones critiques au niveau de la régularisation. Les fonctions de pondération actuelles ne prennent pas en compte de manière spécifique ces zones et on peut donc observer des phénomènes tels que l'attirance de l'endommagement par les bords libres. Il est donc nécessaire de modifier la régularisation le long des bords et dans les zones endommagées. Nous observons également que la valeur de la longueur caractéristique influence fortement les résultats. Une valeur correspondant à trois fois la taille du plus gros granulat étale la zone endommagée de manière trop importante et empêche souvent de distinguer différentes zones d'endommagement distinctes qui pour le post-traitement vont être utilisées pour caractériser l'évolution de l'ouverture de fissure.

Références

[1] Mivelaz P. Etanchéité des structures en béton armé - fuites au travers d'un élément fissuré., 1996. Thèse de docotorat, EPFL, 1539, Lausanne, Switzerland.

[2] CEA . Url : http ://www-cast3m.cea.fr/cast3m.index.jsp.

[3] Mazars J. Application de la mécanique de l'endommagement au comportement non linéaire et à la rupture du béton de structure., 1984. Thèse d'état, Université Paris 6, ENS Cachan, France.

[4] Pijaudier-Cabot G. and Bazant Z. P. Non local damage theory. J. of Eng. Mech., 113, 10 1512–1533, 1987.

[5] Saouridis C. and Mazars J. Prediction of the failure and size effect in concrete via biscale damage approach. Eng. Comp. J., pages 9 : 329–344, 1992.

[6] Krayani A., Pijaudier-Cabot G., and Dufour F. Boundary effect on weight function in nonlocal damage model. Eng. Fract. Mech., (à paraitre), 2009.

[7] Crisfield M. A. An arclength method including line searches and accelerations. Int. J. for Num. Meth. in Eng., 19, 9 1269–1289, 1983.

[8] Dufour F. Contributions à la modélisation numérique de la fissuration des structures en béton avec prise en compte du fluage et estimation de la perméabilité., 2007. HDR Université de Nantes.

[9] Dufour F., Pijaudier-Cabot G., Choinska M., and Huerta A. Extraction of a crack opening from a continuous approach using regularized damage models. Computers and concrete, 5, 4 375–388, 2008.