

**APPORT DES METHODES NON DESTRUCTIVES POUR L'ÉTUDE DE  
L'AUTO-CICATRISATION DES FISSURES DANS UN BÉTON À HAUTES  
PERFORMANCES : ÉMISSION ACOUSTIQUE ET MIROIRS À  
RETOURNEMENT TEMPOREL**  
*CHARACTERIZATION OF THE SELF HEALING OF CRACKS IN AN  
ULTRA HIGH PERFORMANCE CONCRETE BY MECHANICAL TESTS  
AND TIME REVERSAL MIRRORS*

S. Granger\*, G. Pijaudier-Cabot\*, A.Loukili\*, D. Marlot\*\*, J.C. Lenain\*\*

\* GeM – Ecole Centrale de Nantes – 1, rue de la Noë – BP 92101 – 44321 Nantes Cedex 3

\*\* Euro Physical Acoustics – 27, rue Magellan – 94373 Sucy en Brie Cedex 3

## **Résumé**

L'apport des techniques d'émission acoustique et de retournement temporel dans l'étude de la cicatrisation des fissures dans un BUHP est présenté. Le phénomène de cicatrisation des fissures apparaît en présence d'eau et consiste notamment en la précipitation de nouveaux hydrates au sein de la fissure, recréant ainsi le lien entre les deux lèvres de fissure. L'apport du phénomène sur le plan mécanique (reprise de propriétés mécaniques après une perte due à la fissuration) a été étudié et complété ici par la qualification des processus de fissuration d'éprouvettes cicatrisées sous flexion trois points, par la technique d'émission acoustique. On montre alors que de nouveaux cristaux formés dans la fissure s'endommagent, et que ceux-ci semblent être moins résistants que ceux issus des réactions primaires de formation des hydrates. Parallèlement à cette caractérisation, un autre procédé de contrôle non destructif est développé pour le suivi *in vivo* de l'auto-cicatrisation, avec extension possible à d'autres phénomènes. La technique est basée sur le retournement temporel, et est appliquée pour la première fois à un matériau cimentaire. Des premiers essais de validation de mise en œuvre de la méthode sont réalisés, et une expérimentation démonstratrice permettant le suivi qualitatif de la cicatrisation est présentée.

## **Abstract**

*This paper deals with the role, on mechanical properties, of the self healing of cracks in concrete and with the characterization of the phenomenon by means of an original non-destructive technique based on the time reversal principle. An experimental program is developed on an ultra high performance concrete, considered as a model material. Mechanical tests are carried out on prismatic notched specimens, including pre-cracking and ageing phases, followed by the characterization of the mechanical behaviour of healed specimens. The results show a recovery of mechanical properties. The pre-cracking and ageing phases are also analyzed with the time reversal technique. The propagation and the healing of the crack are related to the evolution of the focusing of signals on a transducer placed on the crack path.*

## 1. INTRODUCTION

La présence de fissures est un des facteurs essentiels influant sur la durabilité du matériau béton, notamment en termes de résistance ou de propriétés de transfert. L'auto-cicatrisation des fissures est un phénomène physico-chimique ayant des répercussions positives sur ces problèmes de durabilité. Ce phénomène apparaît en présence d'eau entre les deux lèvres d'une fissure, et l'accumulation des cristaux issus des réactions chimiques qui sont la cause du phénomène, forme un pont susceptible de rétablir la continuité. C'est le ciment présent dans la microstructure du béton qui réagit avec l'eau et forme, selon les types de béton, des cristaux de calcite  $\text{CaCO}_3$  ou bien de nouveaux hydrates C-S-H (Neville [1]). Dans les recherches antérieures, le phénomène a été principalement mis en évidence par des essais de perméabilité à l'eau, expliquant la diminution voir l'annulation du débit de fuite au travers d'un échantillon de béton fissuré, par l'occurrence de la cicatrisation (Edvardsen [2]). Parallèlement peu d'études ont été menées sur l'apport mécanique du phénomène. La reprise de fréquence de résonance d'éprouvettes initialement fissurées, puis ensuite cicatrisées a néanmoins été mise en évidence. Ce travail de recherche s'inscrit ainsi dans la volonté générale d'apporter de nouveaux éléments pour la compréhension d'un phénomène encore mal connu.

Un programme expérimental complet est ainsi mis en place sur la matrice d'un béton fibré à ultra hautes performances (BFUP). La cicatrisation apparaissant exclusivement dans la pâte de ciment, et pour des raisons liées à l'utilisation en parallèle du système d'émission acoustique, il a été décidé de supprimer les fibres et d'étudier uniquement la matrice cimentaire. Le programme expérimental est ainsi essentiellement basé sur des essais mécaniques visant à mettre en évidence l'apport du phénomène sur les propriétés mécaniques structurelles d'éléments. Les essais comportent 3 phases (Granger et al. [3]):

- une phase de fissuration en flexion 3 points permettant d'endommager de façon contrôlée les éprouvettes. Une largeur de fissure unique de 10  $\mu\text{m}$  est visée.
- le vieillissement des éprouvettes dans l'eau (immersion complète à 20°C) ou dans l'air (à 20°C et 50% HR), pour des périodes allant de 1 à 20 semaines.
- la caractérisation mécanique des éprouvettes vieilles en flexion 3 points.

La phase de fissuration conduit ainsi à une perte de propriétés mécaniques (raideur et résistance structurelles), et le vieillissement dans l'eau (uniquement) amène à une reprise très nette de ces propriétés (notamment au niveau de la raideur) (Granger et al. [3]). Ces résultats sont alors imputés au phénomène de cicatrisation avec précipitation de nouveaux cristaux dans la fissure. Afin de vérifier cela et d'apporter des éléments de compréhension supplémentaires, le recours à des techniques fines d'analyse a été nécessaire. Ainsi l'émission acoustique est utilisée pour mettre en évidence la précipitation de cristaux et de caractériser leurs propriétés mécaniques, et le retournement temporel est utilisé dans le but du suivi de l'avancée du phénomène.

## 2. ANALYSE DE LA FISSURATION DES EPROUVETTES VIEILLIES PAR EMISSION ACOUSTIQUE

Dans le but de suivre et de caractériser le processus de fissuration, toutes les éprouvettes (entaillées afin d'avoir une fissure localisée) sont instrumentées d'un système d'émission acoustique (EA), pendant les périodes de fissuration et de rechargement après vieillissement. Le but est de localiser les microfissures (événements acoustiques) qui apparaissent pendant les essais. L'instrumentation (système DiSP d'Euro Physical Acoustics) comprend 4 voies d'acquisition et une carte pour l'extraction des paramètres acoustiques (amplitude, énergie, durée...). Quatre capteurs piézoélectriques (type R15, avec une fréquence de résonance de 150 kHz) sont placés sur les éprouvettes, afin d'entourer la zone de microfissuration, et de minimiser les erreurs dans les algorithmes de localisation. Les capteurs forment une maille rectangulaire de 140 x 65 mm<sup>2</sup>. Ils sont placés sur une face de l'éprouvette et couplés au matériau avec une colle silicone. La valeur seuil de détection en amplitude est fixée à 30 dB<sub>EA</sub> et les signaux sont amplifiés de 40 dB. Seuls les signaux de fréquence comprise entre 20 et 400 kHz sont détectés. Un algorithme de localisation planaire est utilisé pour la localisation et l'obtention des cartes de microfissuration. La précision est vérifiée avec des tests Hsu-Nielsen et est de l'ordre de 3 mm [5].

Des cartes de microfissuration sont ainsi obtenues lors de la phase de rechargement des éprouvettes, cicatrisées ou non. La figure (1) représente des cartes typiques obtenues en début de rechargement (jusqu'au pic de force), pour des éprouvettes respectivement cicatrisées et non cicatrisées, pendant 10 semaines. Les événements détectés ont été filtrés en énergie, et on s'affranchit ainsi de tous les signaux peu énergétiques détectés en dehors de la zone de macrofissuration (Otsuka et al.[4]).

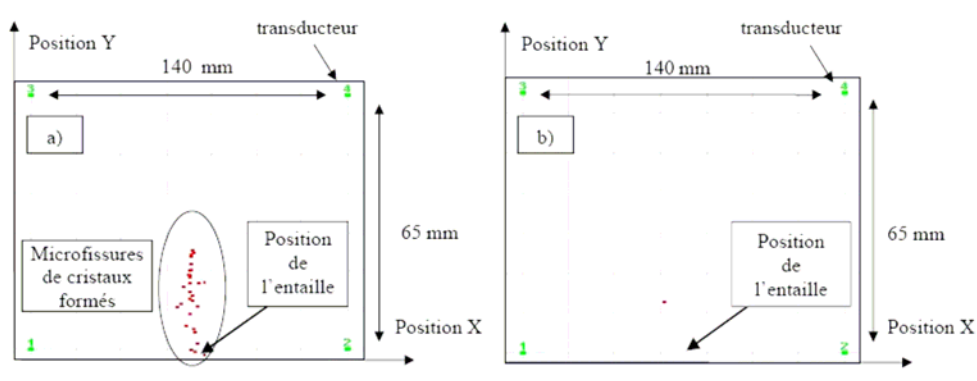


Fig. 1 : Cartes de microfissuration, pendant le début de la phase de rechargement pour des éprouvettes vieilles 10 semaines : a) dans l'eau, b) dans l'air

Cette figure met ainsi clairement en évidence la microfissuration des produits formés dans la fissure pour le cas éprouvette cicatrisée, alors que l'on a une réouverture de la fissure sans détection acoustique pour l'éprouvette non cicatrisée. L'analyse plus précise de ces cartes de localisation peut être menée en termes d'énergie des microfissures détectées. La figure (2) présente ainsi les cartes de microfissuration en énergie pour une éprouvette cicatrisée et pour une éprouvette non cicatrisée, à un stade plus avancé de rechargement, où l'on a quasiment endommagé tous les cristaux qui se sont formés dans la fissure.

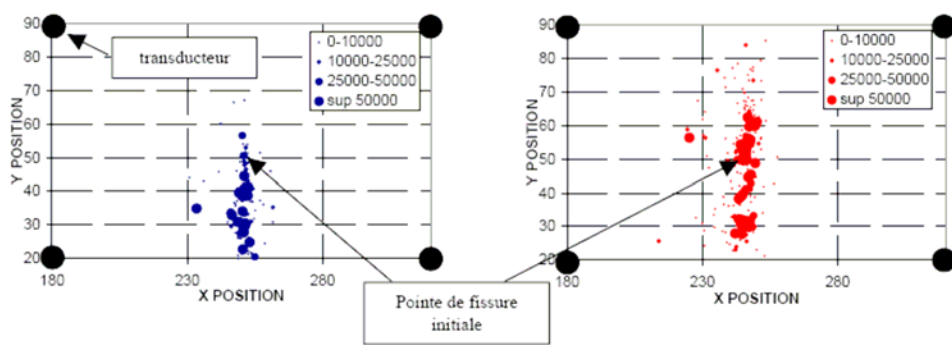


Fig. 2 : Cartes de localisation en énergie : a) éprouvette cicatrisée, b) éprouvette non cicatrisée (énergie en aJ)

Ainsi, presque 100% de l'énergie dissipée se trouve dans la fissure pré-existante dans le cas où il y a cicatrisation, alors que ce pourcentage est de moins de 50% dans le cas où il n'y a pas de cicatrisation (les détections étant dues à des frottements ou réouvertures de microfissures). On met ainsi en évidence les 2 régimes de fissuration des éprouvettes cicatrisées, à savoir la microfissuration des produits néo-formés dans un premier temps, suivie de la poursuite de la propagation de la fissure pré-existante dans un second temps. Si nous sommes ensuite la totalité de l'énergie dissipée à ce stade, on peut s'apercevoir qu'elle est environ 50% plus faible dans le cas de l'éprouvette cicatrisée. Cette énergie correspondant à l'énergie libérée par la fissuration des produits néoformés, alors qu'elle est liée à la fissuration de matériau sain dans le cas de non cicatrisation, on est ainsi en droit de penser que les produits de cicatrisation ont des propriétés mécaniques plus faibles que celles du matériau sain.

### 3. SUIVI DE CICATRISATION PAR RETOURNEMENT TEMPOREL

#### 3.1 Principe du retournement temporel

Le principe du retournement temporel et la technique associée ont été développés par Fink [5, 6]. Ils reposent sur l'invariance de l'équation de propagation des ondes lorsque le temps est retourné. En pratique, si les pertes d'énergie sont faibles dans le matériau considéré, les équations gouvernant la propagation des ondes assurent que des signaux émis depuis une source, peuvent être renvoyés à leur source après avoir été retournés dans le temps et réémis dans le matériau. Les ondes convergent de façon synchronisée à leur source originelle, recréant ainsi le signal initial. En théorie, le signal à la source est recréé mais en pratique, tenant compte des inévitables absorption et dispersion, la focalisation (ou convergence) est reliée au maximum en amplitude et en énergie du signal. La focalisation au point source est alors influencée par les changements qui peuvent apparaître dans le matériau, et permet ainsi de mettre en évidence des défauts. La méthode est de plus auto-adaptative, dans le sens où elle prend en compte les distorsions de phase et d'amplitude pendant la propagation. Les hétérogénéités du matériau sont sans importance, et la méthode a donc le grand intérêt de pouvoir être appliquée aux matériaux hétérogènes tels que le béton.

En théorie, le signal doit être enregistré dans toutes les directions pour pouvoir être renvoyé, mais en pratique ce n'est pas possible, et l'enregistrement est limité à un réseau de capteurs que l'on appelle un miroir à retournement temporel. Nous utiliserons ici un miroir composé de 4 capteurs piézoélectriques large bande, résonnant à 1 MHz.

### 3.2 Expérimentation démonstratrice

L'idée d'expérience associée à la cicatrisation des fissures est de suivre périodiquement la focalisation de signaux au niveau d'une pointe de fissure qui cicatrise, et de relier l'évolution de cette focalisation à l'avancée du phénomène. L'idée générale est tout de même de montrer que le retournement temporel peut être appliqué à un matériau cimentaire dans le but de suivre des phénomènes. Des essais de focalisation basés sur le même type d'expérimentations que Draeger et Fink [7] ont ainsi montré que le principe semblait raisonnablement fonctionner pour le matériau béton utilisé (Granger [8]).

Nous présentons alors maintenant une première expérience menée sur la cicatrisation. Au lieu de détecter et de réémettre des signaux provenant de la microfissuration (ce qui est, à terme, l'objectif), nous plaçons un capteur sur le chemin de fissure pour simuler une source externe. Ce transducteur émet alors un pulse (10V pendant 0,5  $\mu$ s) détecté par le miroir composé de 4 transducteurs. Le signal détecté sans endommagement de l'éprouvette de béton est conservé et périodiquement réémis dans la structure pendant la phase de fissuration, puis de cicatrisation. La focalisation au niveau du capteur placé sur le chemin de fissure est alors analysée. La figure (3) montre alors l'évolution du spectre fréquentiel pendant la fissuration puis la cicatrisation, mettant ainsi en évidence une perte de signal pendant la fissuration, et une reconstruction progressive pendant la cicatrisation. L'ensemble des résultats (Granger [8]) associés à cette expérimentation constitue alors une première approche qualitative de suivi de phénomène par retournement temporel dans le béton.

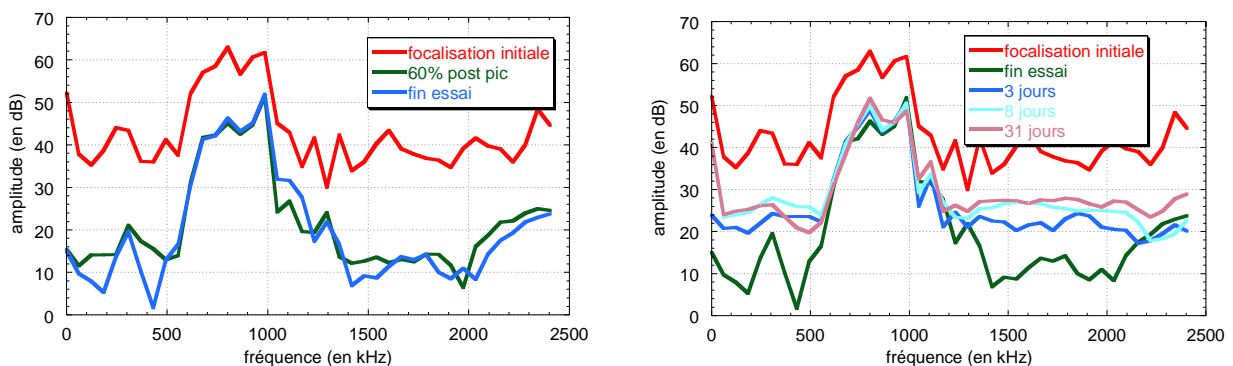


Fig. 3 : Evolution des spectres fréquentiels du signal focalisé avec le développement de la fissuration (gauche) et la cicatrisation (droite)

## BIBLIOGRAPHIE

- [1] A.Neville, "Autogenous healing – A concrete miracle", Concrete International, 76-82 (2002)
- [2] C.Edvardsen, "Water permeability and autogenous healing of cracks in concrete", ACI Materials Journal 96(4), 448-454 (1999)
- [3] S.Granger, A.Loukili, G.Pijaudier-Cabot, G.Chanvillard, "Experimental characterization of the self healing of cracks in an ultra high performance cementitious material: mechanical tests and acoustic emission analysis", Cement and Concrete Research 37(4), 519-527 (2007)
- [4] K.Otsuka, H.Date, "Fracture process zone in concrete tension specimen", Cement and Concrete Research 65(2-3), 111-131 (2000)
- [5] M.Fink, "Time Reversal in ultrasonic fields – Part 1: basic principles", IEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control 39(5), (1992)
- [6] M.Fink, "Time reversed acoustics", Scientific American, 67-73 (novembre 1999)
- [7] C.Draeger, M.Fink, "One channel time reversal of elastic waves in a 2D silicon cavity", Physical Review Letter 79, 407-410 (1997)
- [8] S.Granger, Caractérisation expérimentale et modélisation du phénomène d'auto-cicatrisation des fissures dans les bétons, thèse de doctorat, Ecole Centrale de Nantes (2006)