



**HAL**  
open science

## Caractérisation expérimentale du phénomène d'autocicatrisation des fissures dans le béton

Sébastien Granger, Ahmed Loukili, Gilles Pijaudier-Cabot, Gilles Chanvillard

► **To cite this version:**

Sébastien Granger, Ahmed Loukili, Gilles Pijaudier-Cabot, Gilles Chanvillard. Caractérisation expérimentale du phénomène d'autocicatrisation des fissures dans le béton. XXIIIe Rencontres de l'AUGC, May 2005, Grenoble, France. hal-00869577

**HAL Id: hal-00869577**

**<https://hal.science/hal-00869577>**

Submitted on 22 Mar 2017

**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.

Public Domain

See discussions, stats, and author profiles for this publication at: <https://www.researchgate.net/publication/280854820>

# Caractérisation expérimentale du phénomène d'autocicatrisation des fissures dans le béton

Article · January 2006

CITATIONS

0

READS

36

4 authors, including:



**Ahmed Loukili**

Ecole Centrale de Nantes

151 PUBLICATIONS 1,469 CITATIONS

[SEE PROFILE](#)



**G. Pijaudier-Cabot**

Université de Pau et des Pays de l'Adour

282 PUBLICATIONS 4,718 CITATIONS

[SEE PROFILE](#)



**Gilles Chanvillard**

LafargeHolcim Research Center

36 PUBLICATIONS 650 CITATIONS

[SEE PROFILE](#)

Some of the authors of this publication are also working on these related projects:



CONTIFISS, Project of The French National Research Agency [View project](#)



ANR MODEVIE [View project](#)

All content following this page was uploaded by [Gilles Chanvillard](#) on 15 August 2015.

The user has requested enhancement of the downloaded file. All in-text references [underlined in blue](#) are added to the original document and are linked to publications on ResearchGate, letting you access and read them immediately.

# Caractérisation expérimentale du phénomène d'autocicatrisation des fissures dans les bétons

Sébastien Granger<sup>1</sup>, Ahmed Loukili<sup>1</sup>, Gilles Pijaudier-Cabot<sup>1</sup> et Gilles Chanvillard<sup>2</sup>

<sup>1</sup> R&DO – Institut de Recherche en Génie Civil et Mécanique (GeM) - UMR CNRS 6183, Ecole Centrale de Nantes – 1, rue de la Noë – 44321 Nantes Cedex 3

<sup>2</sup> Lafarge – Laboratoire Central de Recherche – 95, rue du Montmurier – 38291 St Quentin Fallavier Cedex

---

*RESUME.* Principalement mis en évidence par des essais de perméabilité à l'eau jusqu'à présent, le phénomène d'autocicatrisation des fissures dans les bétons, lié à l'hydratation de ciment ou à la précipitation d'autres cristaux est ici étudié au travers d'essais mécaniques, sur un béton à ultra hautes performances. Des éprouvettes prismatiques entaillées sont endommagées par flexion 3 points en phase post pic, de façon à obtenir une ouverture de fissure résiduelle comprise entre 5 et 15  $\mu\text{m}$ . Après vieillissement dans l'eau et dans l'air, pour différentes périodes, les éprouvettes sont ensuite retestées mécaniquement en flexion 3 points. Les résultats montrent clairement qu'il y a une reprise de raideur globale pour les éprouvettes conservées dans l'eau, alors que le comportement mécanique des éprouvettes conservées dans l'air n'a pas été affecté. On explique cette reprise de rigidité, qui tend vers la rigidité des éprouvettes saines, par la cicatrisation de la fissure initialement formée. Une instrumentation émission acoustique permet également de confirmer les observations sur le phénomène au cours des essais mécaniques.

*MOTS-CLÉS :* autocicatrisation, comportement mécanique, émission acoustique

---

*ABSTRACT.* Due to hydration of anhydrous cement present in concrete or to precipitation of other crystals, and mainly highlighted by water permeability tests, the phenomenon of self healing of cracks in concrete is investigated, in this study, by means of mechanical tests, on an ultra high performance concrete. Prismatic notched specimens are damaged under 3 points bending in the post peak regime, so as to get a residual crack opening between 5 and 15  $\mu\text{m}$ . After ageing in water and air, for different time periods, specimens are then reloaded under 3 points bending. Results clearly show that specimens stored in water exhibit a global stiffness gain, while mechanical behaviour of specimens stored in water is not affected. This gain of stiffness, depending on the time of storage, can be explained by the self healing of the initially generated crack. An acoustic emission analysis is also carried out during mechanical tests, and tend to confirm the mechanical results.

*KEYWORDS :* self healing, mechanical behaviour, acoustic emission

---

## 1. INTRODUCTION

Pour beaucoup de structures en béton en fin de vie, ou encore en service, la question de la durabilité du matériau se pose afin de savoir si la sécurité est toujours assurée. La présence de fissures, dues aux contraintes mécaniques ou aux déformations différées (fluage, retrait...) est un des facteurs principaux pouvant influencer sur la durabilité du béton, en termes de résistance, perméabilité ou propriétés de transfert. L'occurrence du phénomène d'autocicatrisation des fissures et les bénéfices qui peuvent en être tirés, sont principalement significatifs dans la limitation des transferts (notamment liés

à des flux d'eau) dans les bétons, et dans la protection des aciers de renforcement vis à vis de la corrosion. Plusieurs travaux ont montré ces résultats sur des bétons ordinaires ; ils seront présentés dans la première partie. Quelques explications préliminaires sur le phénomène seront ainsi apportées. Néanmoins, les études sur le phénomène restent rares, et celui ci n'a jamais été vraiment quantifié. En particulier, son effet sur le comportement mécanique des bétons, comme indicateur de cette cicatrisation, a été très peu abordé.

Cette étude vise à mettre en évidence l'autocicatrisation grâce à des essais mécaniques. Des éprouvettes prismatiques entaillées ( $50 \times 100 \times 500 \text{ mm}^3$ ) de béton à ultra hautes performances (BUHP) sont endommagées par essais de flexion 3 points en phase post pic, et ensuite déchargées de façon à obtenir une ouverture de fissure résiduelle comprise entre 5 et 15  $\mu\text{m}$ . Une des particularités des BUHP est d'avoir un rapport Eau/Ciment faible (de l'ordre de 0,2 dans notre étude), ce qui implique une quantité importante de ciment non hydraté dans la microstructure du béton durci (50 à 60%) (Loukili *et al*, 1998), ce qui favorise le phénomène. Ce type de béton subit également un traitement thermique qui limite les effets différés (retrait et fluage) (Loukili, 1998, Acker, 2001 et Acker, 2004). Après vieillissement, c'est à dire conservation dans l'eau ou dans l'air pour des périodes comprises entre une et 10 semaines, les éprouvettes sont retestées en flexion 3 points, afin de caractériser le comportement mécanique du béton cicatrisé. Une instrumentation émission acoustique est également mise en place pendant toutes les phases du programme (endommagement et rechargement) afin d'identifier les processus de fissuration avant et après cicatrisation. Le programme expérimental et les résultats sont présentés dans cette contribution.

## 2. LE PHENOMENE D'AUTOCICATRISATION DES FISSURES : ETAT DE L'ART

Le phénomène d'autocicatrisation apparaît entre les 2 lèvres d'une fissure. La cicatrisation ne peut avoir lieu qu'en présence d'eau et elle consiste en des réactions chimiques impliquant des composés présents sur les surfaces de la fissure. Ces réactions produisent de nouveaux cristaux, et l'accumulation de ceux ci depuis les 2 surfaces opposées forme un pont qui rétablit la continuité. La présence de composés capables de réagir avec l'eau est donc nécessaire. C'est donc le ciment, hydraté ou non, qui est cet élément essentiel au phénomène. Il y a 2 grandes hypothèses concernant les réactions de cicatrisation : l'hydratation du clinker anhydre et la précipitation de carbonate de calcium ( $\text{CaCO}_3$ ). La première hypothèse requiert uniquement la présence d'eau, alors que la seconde nécessite également la présence de dioxyde de carbone. Le dépôt et l'accumulation de débris dans la fissure peuvent également contribuer au phénomène, mais ne peuvent pas en être la seule cause.

La majorité des études menées sur le sujet mettent en évidence le phénomène grâce à des essais de perméabilité à l'eau. Une diminution de flux à travers une éprouvette fissurée, est la méthode principale pour montrer le phénomène. Edvardsen a réalisé des essais de ce type, en faisant varier la largeur de fissure (de 0,1 mm à 0,3 mm) et la composition du béton, sur des petites éprouvettes avec une fissure unique obtenue par traction (Edvardsen, 1999). L'auteur explique le phénomène exclusivement par la précipitation de  $\text{CaCO}_3$ , ce qui est confirmé par des tests de diffraction de rayons X sur les lèvres de la fissure. Edvardsen montre également que ni la composition du béton (on reste dans la gamme des bétons ordinaires), ni la teneur de l'eau en  $\text{CaCO}_3$  dissous ont une influence sur le phénomène.

Hearn a également réalisé des essais de perméabilité à l'eau sur des mortiers (avec 78% de clinker hydraté) et sur un béton curé de 26 ans contenant une quantité insignifiante de ciment anhydre. Elle examine les effets chimiques, comme la poursuite de l'hydratation, et la dissolution-déposition de composés solubles ( $\text{CaCO}_3$  et autres) (Hearn, 1997 et Hearn, 1998). L'auteur montre, qu'après séchage, il y a augmentation de la perméabilité à l'eau initiale suivie du phénomène d'autocicatrisation. Hearn réalise également des analyses chimiques de l'eau, avant et après avoir circulé dans la fissure, qui montrent une augmentation de la concentration en ions  $\text{Ca}^{2+}$  après percolation. Ceci met en évidence les phénomènes de dissolution-déposition, notamment de calcite  $\text{CaCO}_3$ . De plus, des tests réalisés en remplaçant l'eau par du propan-2-ol confirment le fait que le remplissage de la fissure par des particules n'est pas responsable du phénomène, puisqu'il n'y a pas cicatrisation alors que les viscosités des 2 fluides sont très proches. Le fait de faire circuler le fluide dans l'autre sens à l'intérieur de la fissure montre également que la cicatrisation est permanente. Concernant la poursuite de l'hydratation, aucune évidence réelle n'est établie par Hearn.

Un autre type d'expérimentations est proposé par Jacobsen pour caractériser l'autocicatrisation des fissures (Jacobsen *et al*, 1995 et Jacobsen *et al*, 1996). Les essais consistent à endommager par cycles de gel-dégel, des cubes de béton, et à les conserver ensuite dans l'eau pendant 3 mois (à 20°C). Deux compositions de rapport E/C égal à 0,4 sont testées, l'une avec fumée de silice et l'autre sans. L'endommagement et la cicatrisation des éprouvettes sont mesurés à l'aide des fréquences de résonance et de la résistance en compression. Les cycles gel-dégel conduisent à une diminution conjointe des fréquences de résonance et des résistances en compression des éprouvettes. La cicatrisation des fissures apporte une reprise sensible de la fréquence de résonance, alors qu'une faible reprise de la résistance en compression est constatée. L'auteur explique ce dernier point par le fait que la fissure n'est pas entièrement remplie par les produits nouvellement formés. De telles explications ont été confirmées par des observations microscopiques effectuées par Jacobsen. Elles montrent également que la majorité des nouveaux cristaux sont des CSH. Mais la portlandite ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) a aussi été observée localement. L'étude précise également que l'autocicatrisation des fissures est moins apparente dans le béton contenant de la fumée de silice. Ces résultats en comparaison avec ceux d'Edvardsen permettent de dire qu'aucune conclusion générale ne peut être tirée concernant les cristaux nouvellement formés dans la fissure.

Un dernier point qui mérite d'être abordé est la question de l'ouverture maximale de fissure pouvant être totalement cicatrisée. Les différents travaux rapportent des largeurs maximales très différentes. Ce n'est pas très surprenant car les conditions d'essais sont très différentes d'une étude à l'autre. Par exemple, Edvardsen montre que des fissures larges de 0,3 mm peuvent cicatriser, alors que Jacobsen travaille sur des largeurs de fissures de 1  $\mu\text{m}$  à 10  $\mu\text{m}$ .

En conclusion, ces quelques travaux ont mis en évidence que le phénomène d'autocicatrisation était un phénomène physico-chimique complexe, qui a été caractérisé jusqu'à présent, quasi uniquement grâce à des essais de perméabilité à l'eau. Néanmoins, aucune conclusion n'a pu être apportée pour expliquer ce qui se passait réellement dans les fissures. Très peu de résultats ont été proposés concernant le comportement mécanique de bétons cicatrisés. Outre Jacobsen, une étude de Pimienta et Chanvillard (Pimienta et Chanvillard, 2004) a apporté de nouveaux résultats sur de tels bétons. L'étude présentée dans cet article vise à apporter de nouvelles orientations concernant le phénomène.

### 3. PROGRAMME EXPERIMENTAL

#### 3.1. DESCRIPTION DU MATERIAU ET DES EPROUVETTES

Le programme expérimental a été mené sur un béton à ultra hautes performances (BUHP) de rapport Eau/Ciment proche de 0,2, et contenant de la fumée de silice. Le béton est mélangé dans un malaxeur classique, et la rhéologie se situe entre fluide et autoplaçant. Après coulage, les éprouvettes sont conservées pendant 2 jours à 20°C et à une humidité relative de 100%. Un traitement thermique est ensuite appliqué pour améliorer les propriétés mécaniques. Les conditions de ce traitement sont 90°C et une humidité relative de 100%, ceci pendant 48 heures. Les éprouvettes sont prismatiques et de dimensions 50x100x500 mm<sup>3</sup>. Une entaille de profondeur 20 mm et de largeur 1,5 mm est réalisée dans chaque éprouvette, en plaçant une petite plaque de plexiglas au centre du moule perpendiculairement à la plus grande dimension de l'éprouvette. Trois éprouvettes identiques sont réalisées pour chaque condition de test.

#### 3.2. CONFIGURATION DES ESSAIS MECANIQUES

Les éprouvettes sont préfiissurées, et ensuite rechargées par essais de flexion 3 points. La machine utilisée est une presse INSTRON de capacité 160 kN. Les essais sont pilotés en ouverture d'entaille, à une vitesse constante de 0,05 µm/s. La configuration de l'essai est présentée sur la figure 1.

La préfiissuration est réalisée en phase post pic. Après avoir atteint le pic (généralement compris entre 3 et 4 kN), la décharge est amorcée lorsque la force appliquée atteint 2 kN, l'ouverture d'entaille est alors de l'ordre de 30 µm. La largeur de fissure résiduelle obtenue après déchargement est comprise entre 5 µm et 15 µm. Le rechargement après vieillissement des éprouvettes est réalisé également en contrôle d'ouverture d'entaille à la même vitesse que pour la préfiissuration.

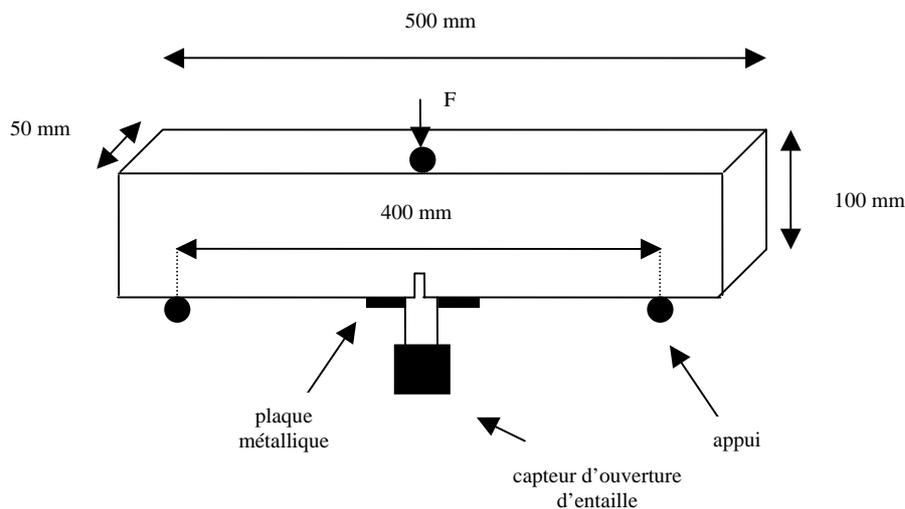


Figure 1 : Configuration de l'essai mécanique

### 3.3. INSTRUMENTATION EMISSION ACOUSTIQUE

Une acquisition émission acoustique est également réalisée pendant tous les essais mécaniques (préfiissuration et rechargement). Le système émission acoustique comprend une carte d'acquisition 8 voies MISTRAS (PC-DISP4). Quatre transducteurs piézoélectriques (fréquence de résonance de 150 kHz) sont placés sur une face de l'éprouvette en une maille rectangulaire (140x65 mm<sup>2</sup>), juste au dessus de l'entaille, et sont couplés avec le matériau grâce à une colle silicone (voir figure 2). Les signaux détectés sont amplifiés grâce à des amplificateurs de 40 dB.

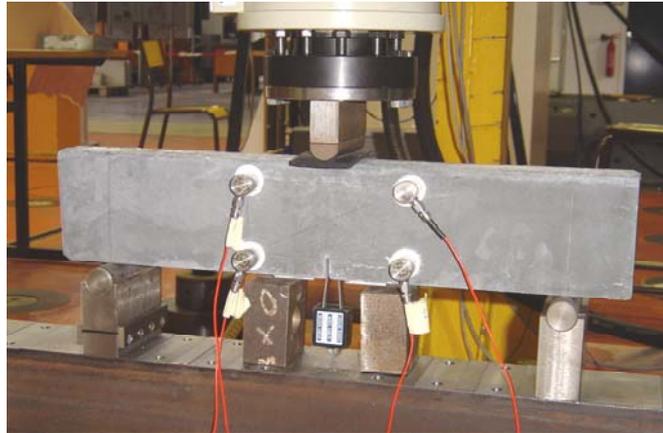


Figure 2 : Essai mécanique et instrumentation émission acoustique

### 3.4. CONDITIONS DE VIEILLISSEMENT

Quatre durées de vieillissement ont été choisies : une semaine, 3 semaines, 6 semaines et 10 semaines. Après la phase de préfiissuration, et pour chaque période, 3 éprouvettes ont été placées dans l'eau et 3 autres dans l'air. Les éprouvettes vieillies dans l'eau sont totalement immergées à 20°C, et les éprouvettes conservées dans l'air le sont dans des sacs plastiques fermés, à 20°C également. Après chaque période de vieillissement, les éprouvettes sont rechargées en flexion 3 points pour caractériser leur comportement mécanique.

## 4. RESULTATS ET DISCUSSION

### 4.1. MISE EN EVIDENCE MECANIQUE DU PHENOMENE D'AUTOCICATRISATION

Les résultats des essais mécaniques sont présentés sur les figures 3 et 4. Pour chaque période et pour les 2 conditions de vieillissement (air et eau), chaque courbe présente 2 phases, la préfiissuration puis le rechargement. Les courbes représentent la force appliquée en fonction de l'ouverture d'entaille. La figure 3 montre le comportement mécanique typique de 3 éprouvettes vieillies dans l'air (ici 3 semaines), afin de montrer la reproductibilité des essais. On peut remarquer la continuité de toutes les courbes de rechargement avec les courbes de préfiissuration. Dans la suite, seulement une courbe de chaque condition de vieillissement est présentée, et seulement la phase de rechargement. La figure 4 présente les courbes pour des éprouvettes vieillies dans l'air et dans l'eau, pour les 4 périodes. On constate clairement qu'il n'y a pas de gain de raideur au niveau du comportement mécanique d'éprouvettes rechargées après conservation dans l'air. Il n'y a clairement pas eu cicatrisation de la fissure initialement créée. En comparaison, il y a une reprise de raideur pour les éprouvettes conservées dans l'eau, ce qui peut s'expliquer par la cicatrisation de la fissure. Cette raideur tend vers

la raideur initiale, c'est à dire celle du matériau sain. Le gain dépend du temps de cicatrisation, et est plus important pour les périodes de conservation les plus longues.

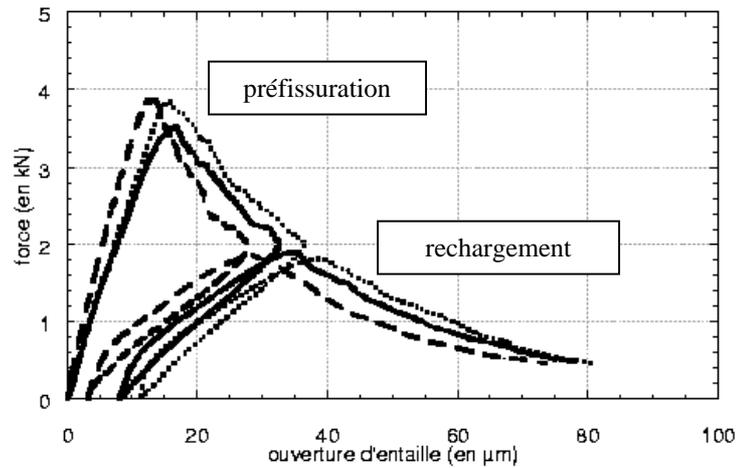


Figure 3 : Comportement mécanique de 3 éprouvettes vieilles dans l'air (3 semaines) –  
Reproductibilité des essais

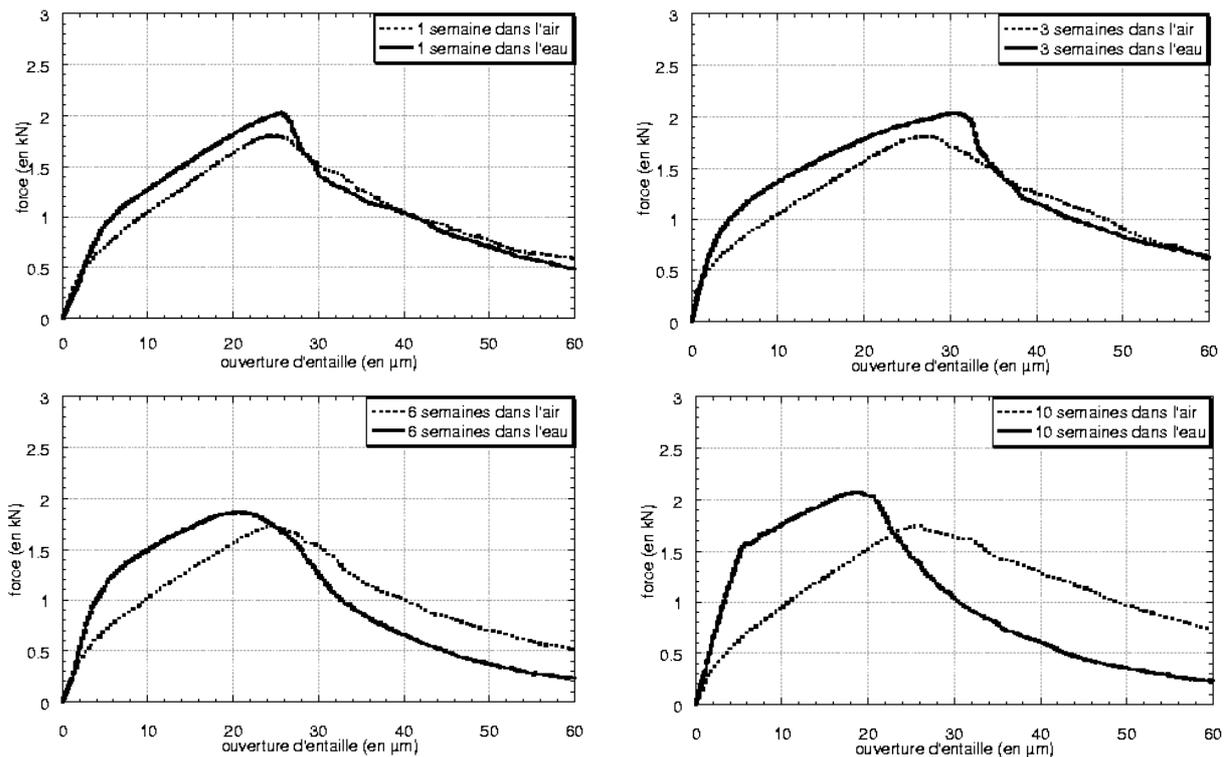


Figure 4 : Comportement mécanique des éprouvettes cicatrisées pour les différentes périodes –  
Comparaison entre vieillissement dans l'air et vieillissement dans l'eau (courbes de rechargement)

On peut constater que la reprise de rigidité liée à l'autocicatrisation est d'autant plus grande que le temps de conservation dans l'eau est long. Le tableau 1 présente l'évolution avec le temps de la raideur de rechargement.

Eprouvette saine	Eprouvette conservée 1 semaine dans l'eau	Eprouvette conservée 3 semaines dans l'eau	Eprouvette conservée 6 semaines dans l'eau	Eprouvette conservée 10 semaines dans l'eau
0.307 kN/mm	0.209 kN/mm	0.283 kN/mm	0.301 kN/mm	0.306 kN/mm

Tableau 1 : Evolution de la raideur moyenne de rechargement avec le temps de vieillissement

Ces résultats montrent un effet de cicatrisation sur les éprouvettes, pouvant être imputé à la formation de nouveaux cristaux dans la fissure. Le rapport E/C du béton étant faible, on peut supposer que ce sont de nouveaux hydrates avec une raideur proche de celle des hydrates issus de l'hydratation primaire. Par contre, aucune amélioration de la résistance en flexion des éprouvettes n'est constatée, et la cicatrisation ne rend pas le matériau plus ductile. On peut également remarquer que l'ouverture d'entaille au niveau du pic de rechargement décroît avec le temps de cicatrisation (résultat confirmé par les résultats émission acoustique ci après). Ce résultat peut être expliqué par le fait que de nouveaux produits cristallisant dans la fissure. La longueur de celle-ci diminue et affecte ainsi le comportement mécanique global.

#### 4.2. ANALYSE DES RESULTATS EMISSION ACOUSTIQUE

Le but de l'analyse émission acoustique était clairement à l'origine, de localiser les évènements liés à la microfissuration des produits nouvellement formés dans la fissure. Des cartes de localisation des évènements liés aux processus de fissuration ont été obtenues pour toutes les éprouvettes. Les premières observations n'ont néanmoins pas permis de distinguer clairement les évènements liés à la cicatrisation. L'exploitation de ces cartes de localisation doit être améliorée grâce à l'analyse des signaux propres à chaque évènement, et de leur forme d'onde, afin de mettre en évidence des formes d'ondes spécifiques liées à l'autocicatrisation. Néanmoins, l'évolution du nombre cumulé d'évènements détectés, en fonction de l'ouverture d'entaille, tend à confirmer les résultats mécaniques obtenus (figure 5).

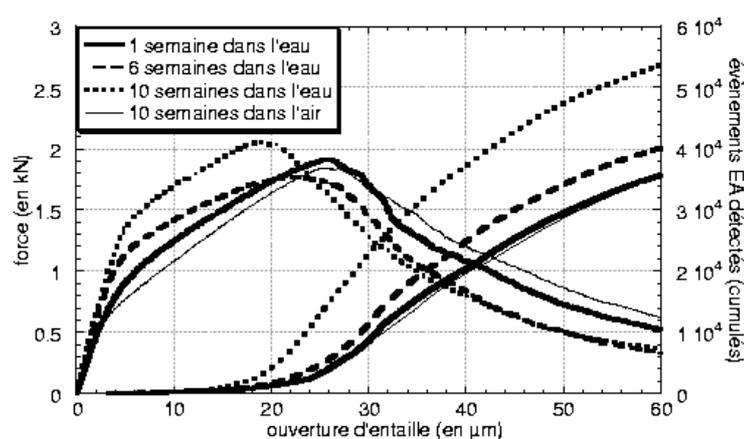


Figure 5 : Evolution du nombre d'évènements acoustiques détectés, en comparaison avec le comportement mécanique des éprouvettes (courbes moyennes)

Les résultats montrent que l'augmentation soudaine du nombre d'évènements détectés, coïncide avec le pic du comportement mécanique de l'éprouvette cicatrisée.

## 5. CONCLUSIONS

Les résultats d'une étude expérimentale sur l'évolution des caractéristiques mécanique d'éprouvettes initialement préfissurées, et ensuite vieilles, sont présentés. Différentes conditions de conservation ont été adoptées, dans l'air et dans l'eau. Après une semaine de conservation dans l'eau, il apparaît que les éprouvettes endommagées tendent à reprendre de la raideur. Ceci est confirmé après 3, 6 et 10 semaines de conservation dans l'eau, alors que les propriétés mécaniques du béton endommagé conservé dans l'air ne sont pas affectées. Le béton utilisé dans cette étude a une quantité importante de clinker anhydre au sein de sa microstructure, et ces observations sont attribuées au phénomène d'autocicatrisation, avec cristallisation de nouveaux hydrates au sein de la fissure. Cette reprise de raideur est plus importante pour les durées de vieillissement les plus longues, et on peut s'attendre à retrouver la rigidité des éprouvettes saines après des temps de cicatrisation encore plus importants. Néanmoins, ces résultats ne montrent pas d'évolution de la résistance en flexion des éprouvettes avec la cicatrisation. Les observations sont en partie confirmées par l'analyse émission acoustique effectuée. Maintenant, l'ensemble de cette étude a besoin d'être améliorée par une analyse émission acoustique encore plus précise (notamment au niveau des formes d'onde des signaux détectés) et par des observations microscopiques. La modélisation du comportement mécanique des éprouvettes cicatrisées va également être abordée par la suite.

## 6. BIBLIOGRAPHIE

- Loukili A., Richard P., Lamirault J. (1998) « A study on delayed deformations of an ultra high strength cementitious material » *ACI SP179-59, Recent Advances in Concrete Technology*, vol. 179
- Acker P. (2001) « Micromechanical analysis of creep and shrinkage mechanisms » *Creep, Shrinkage and Durability Mechanics of Concrete and other quasi-brittle Materials*, F-J. Ulm, Z-P. Bazant, F-H. Wittmann editors, Elsevier, Oxford UK
- Acker P. (2004) « Swelling, shrinkage and creep : a mechanical approach to cement hydration » *Concrete Science & Engineering*, vol. 37, p. 237-243
- Edvardsen C. (1999) « Water permeability and autogenous healing of cracks in concrete » *ACI Material Journal*, vol. 96, n°4, p. 448-454
- Hearn N. (1997) « Self-healing property of concrete – Experimental evidence » *Materials and Structures*, vol. 30, p. 404-411
- Hearn N. (1998) « Self-sealing, autogenous healing and continued hydration : what is the difference ? » *Materials and Structures*, vol. 31, p. 563-567
- Jacobsen S., Marchand J., Hornain H. (1995) « Sem observations of the microstructure of frost deteriorated and self-healed concrete » *Cement and Concrete Research*, vol. 25, n°8, p. 55-62
- Jacobsen S., Sellevold E. (1996) « Self-healing of high strength concrete after deterioration by freeze/thaw » *Cement and Concrete Research*, vol.26, n°1, p. 55-62
- Pimienta P., Chanvillard G. (2004) « Retention of the mechanical performances of Ductal® specimens kept in various aggressive environments » *Fib - Symposium 2004*, Avignon