



HAL
open science

Caractérisation expérimentale du phénomène d'auto-cicatrisation des fissures sur un béton à ultra-hautes performances

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'auto-cicatrisation des fissures sur un béton à ultra-hautes performances. *Revue Européenne de Génie Civil*, 2006, 10 (3), pp.279-294. 10.1080/17747120.2006.9692828 . hal-01006686

HAL Id: hal-01006686

<https://hal.science/hal-01006686>

Submitted on 18 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.



Distributed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License

Caractérisation expérimentale de l'auto-cicatrisation des fissures dans un béton à ultra-hautes performances

Sébastien Granger* — Ahmed Loukili*
Gilles Pijaudier-Cabot* — Gilles Chanvillard**

* R&DO – Institut de Recherche en Génie Civil et Mécanique (GeM), UMR CNRS
6183, Ecole Centrale de Nantes, 1, rue de la Noë F-44321 Nantes cedex 3
{sebastien.granger, ahmed.loukili, gilles.pijaudier-cabot}@ec-nantes.fr

** Lafarge – Laboratoire Central de Recherche – 95, rue du Montmurier
F-38291 St Quentin Fallavier cedex
gilles.chanvillard@pole-technologique.lafarge.com

RÉSUMÉ. L'auto-cicatrisation des fissures sur un béton à ultra-hautes performances, considéré comme matériau modèle, est étudiée au travers d'essais mécaniques et acoustiques. Le phénomène, principalement mis en évidence par des essais de perméabilité à l'eau jusqu'à maintenant, est ainsi quantifié. Le comportement mécanique en flexion 3 points d'éprouvettes de béton cicatrisées et une analyse par émission acoustique des mécanismes de fissuration sont proposés. Les essais mécaniques montrent une reprise de raideur globale, dépendant du temps de cicatrisation, pour les éprouvettes initialement endommagées et ensuite cicatrisées, et une légère reprise de résistance. En parallèle, l'analyse par émission acoustique est menée afin de montrer la précipitation de nouveaux cristaux dans la fissure, responsables de cet apport sur le plan mécanique. La microfissuration de ces cristaux pendant les essais de flexion 3 points est ainsi mise en évidence.

ABSTRACT. Self-healing of cracks in an ultra high performance concrete is investigated in this paper. An experimental program is carried out to quantify the phenomenon, which has been mainly highlighted by means of water permeability tests until now. Mechanical behaviour of self-healed concrete under 3 points bending, and acoustic emission analysis of the cracking mechanisms are reported. The mechanical tests demonstrate a recovery of the global stiffness, depending on the time of healing, for beams initially cracked and then self-healed, and a slow improvement of structural strength. The acoustic emission analysis is carried out in order to show the mechanical response of new crystals precipitating in the crack. The microcracking of these crystals during the 3 points bending tests is highlighted.

MOTS-CLÉS : auto-cicatrisation, comportement mécanique, émission acoustique.

KEYWORDS: self healing, mechanical behaviour, acoustic emission.

1. Introduction

Pour beaucoup de structures en béton en fin de vie, ou encore activement 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 effets différés (fluage, retrait...) est un des facteurs principaux pouvant influencer sur la durabilité du béton, en termes de résistance, perméabilité ou propriétés de transfert.

L'auto-cicatrisation des fissures est un phénomène ayant des répercussions positives sur ces problèmes de durabilité. Le phénomène ne peut avoir lieu qu'en présence d'eau (la présence de CO_2 dissous n'est pas toujours nécessaire) et 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 deux surfaces opposées forme un pont susceptible de rétablir 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 deux grandes hypothèses concernant les réactions de cicatrisation (Neville, 2002) : l'hydratation du clinker anhydre présent dans la microstructure du béton durci et la précipitation de carbonate de calcium (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 jusqu'ici met en évidence le phénomène grâce à des essais de perméabilité. La diminution du flux d'eau à travers un échantillon de béton fissuré jusqu'à son annulation, est la principale méthode pour montrer la cicatrisation de fissures. (Edvardsen, 1999) a réalisé ce type d'essais sur des échantillons de béton ayant une seule fissure obtenue par traction. Le résultat typique montre une première phase de diminution significative du flux, suivie d'une deuxième phase de réduction plus lente, mettant en évidence la réaction immédiate des composés sur les lèvres de fissure, puis ensuite leur réaction par diffusion à travers les composés nouvellement formés. Edvardsen explique le phénomène exclusivement par la cristallisation de carbonate de calcium CaCO_3 . Hearn (Hearn, 1997 et 1998) réalise également des essais de perméabilités à l'eau sur des mortiers (contenant 78 % de ciment hydraté), et sur des bétons curés dans l'eau contenant une infime quantité de clinker anhydre. L'auteur analyse les effets chimiques, tels que l'hydratation, la dissolution et la déposition de composés solubles. Des analyses chimiques de l'eau, avant et après percolation dans le matériau, montrent une augmentation significative de la concentration en ions Ca^{2+} à la sortie, qui indique un phénomène de dissolution-déposition, spécialement de carbonate de calcium CaCO_3 . Ces essais montrent ainsi que le phénomène est de première importance pour les problèmes d'étanchéité et de transferts dans les structures en béton. Un autre type d'essais mettant en évidence le phénomène est proposé par Jacobsen (Jacobsen, 1996). Les essais consistent à endommager par des cycles de gel-dégel, des cubes de

béton, et à les conserver ensuite dans l'eau pendant 3 mois (à 20 °C). L'endommagement et la cicatrisation des éprouvettes sont mesurés à l'aide des fréquences de résonance et de la résistance en compression. Les cycles de 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 (Jacobsen, 1995). Elles montrent également que la majorité des nouveaux cristaux sont des CSH.

Ces rares travaux quantifiant le phénomène (qui a, par ailleurs, été beaucoup mentionné dans la littérature) montrent que l'auto-cicatrisation des fissures dans le béton est un phénomène physico-chimique complexe, et qu'aucune réelle conclusion ne peut être avancée pour décrire ce qui se produit dans la fissure. De plus, peu d'essais ont été proposés concernant le rôle de la cicatrisation au niveau des propriétés mécaniques. Outre Jacobsen (Jacobsen, 1996), une étude menée par Pimienta et Chanvillard (Pimienta et Chanvillard, 2004) a apporté de nouveaux résultats sur cet aspect. Cette contribution vise à apporter des éléments complémentaires concernant le comportement mécanique de bétons cicatrisés. Un programme expérimental est développé, sur un béton à ultra hautes performances considéré comme un matériau modèle avec une composition fixée. Les essais consistent en la fissuration d'éprouvettes prismatiques, et leur caractérisation mécanique après cicatrisation, par des essais de flexion 3 points. Le comportement mécanique d'éprouvettes pour différentes périodes de cicatrisation est présenté et une analyse par émission acoustique est proposée avec pour but de mettre en évidence la précipitation de nouveaux cristaux formés dans la fissure, et de donner des informations sur le processus de fissuration d'éprouvettes cicatrisées. Les résultats sont ensuite analysés, et les conclusions présentées.

2. Programme expérimental

2.1. Description du matériau et des éprouvettes

Le programme expérimental a été mené sur un béton à ultra-hautes performances (BUHP) de rapport eau/ciment proche de 0,2. Cette caractéristique implique une quantité importante de ciment non hydraté (Loukili, 1998) qui peut ainsi contribuer au phénomène de cicatrisation si l'on considère la part importante de l'hydratation du ciment anhydre dans le mécanisme du phénomène. Ce béton est considéré comme un matériau modèle pour le programme expérimental, et l'influence de la composition sur le phénomène n'est donc pas prise en compte dans cette étude. La composition de ce béton comprend du sable, de l'eau, du ciment, de la fumée de silice, et un superplastifiant. Le béton est mélangé dans un malaxeur classique, et sa

rhéologie est comprise entre fluide et autoplaçant. Afin d'avoir une localisation de la fissuration pendant les essais mécaniques, 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. 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 afin d'accélérer les réactions d'hydratation et de favoriser la réaction pouzzolanique. Les éprouvettes (de dimensions 50 x 100 x 500 mm³) sont ainsi placées à 90 °C et 100 % d'humidité relative pendant 48 heures. Grâce à ce traitement, le béton devient stable et présente de faibles déformations différées par retrait ou fluage (Acker, 2001 ; 2004).

2.2. Configuration des essais mécaniques

Le principe des essais mécaniques réalisés est l'endommagement d'éprouvettes prismatiques entaillées en flexion 3 points, suivi de leur vieillissement dans des conditions spécifiques permettant ou non l'auto-cicatrisation, et la caractérisation mécanique de ces éprouvettes vieilles.

Pendant la première phase du programme, les éprouvettes sont pré-fissurées en flexion 3 points. Les essais sont contrôlés en ouverture d'entaille avec une vitesse constante de 0,05 µm/s. L'ouverture d'entaille est mesurée à l'aide d'un capteur spécifique, placé entre 2 plaques métalliques collées de chaque côté de l'entaille sous la face inférieure de l'éprouvette (voir figure 1).

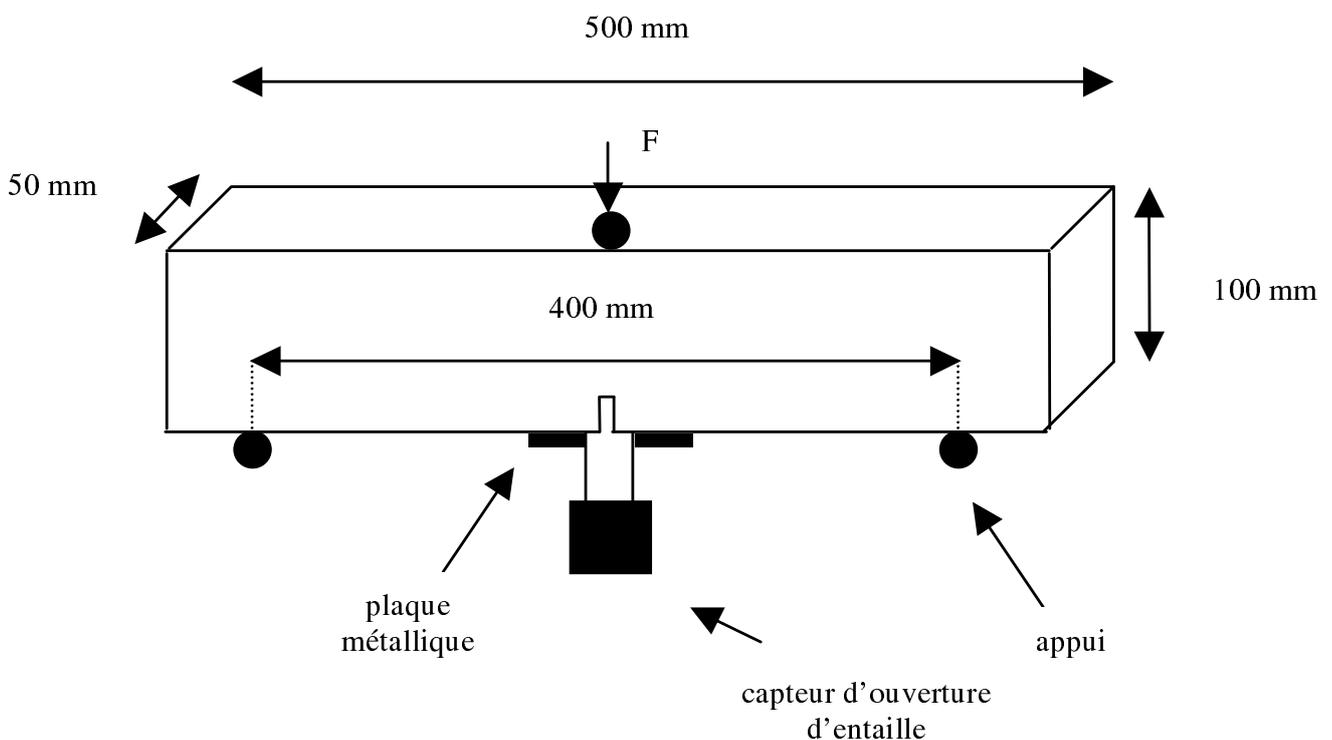


Figure 1. Configuration de l'essai mécanique

Le but de cette première étape est d'obtenir une fissuration contrôlée de l'éprouvette. L'objectif étant de montrer l'apport mécanique de la cicatrisation, une largeur unique de fissure d'environ 10 μm , permettant ainsi un phénomène rapide, a été visée. L'influence de la largeur de fissure sur le phénomène (Edvardsen, 1999 et Reinhardt, 2003) n'est ici pas étudiée. La pré-fissuration est donc réalisée en phase post pic : après le pic (compris généralement entre 3 et 4 kN), le déchargement est effectué lorsque la force appliquée atteint 2 kN, ce qui représente approximativement 60 % de la force au pic. Ce déchargement est également contrôlé en ouverture d'entaille à la même vitesse que le chargement. Les ouvertures d'entaille résiduelles obtenues après déchargement pour chaque éprouvette sont comprises entre 8 μm et 15 μm . Les essais sont donc reproductibles malgré une légère dispersion.

Après cette première étape, les éprouvettes sont conservées dans des conditions spécifiques de vieillissement. Cinq périodes de vieillissement ont été choisies : 1, 3, 6, 10 et 20 semaines. Il y a 2 types de conservation : pour chaque période de vieillissement, des éprouvettes fissurées ont été conservées dans l'eau, et d'autres dans l'air. Les éprouvettes vieilles dans l'eau (du robinet) sont totalement immergées à 20 °C. Il n'y a ni mouvement, ni renouvellement de cette eau. Les éprouvettes conservées dans l'air le sont dans des sacs fermés, à 20 °C et 50 % d'humidité relative, afin de ne pas activer l'hydratation du ciment anhydre. Après chaque période de vieillissement, la dernière étape du programme expérimental consiste à recharger les éprouvettes en flexion 3 points, dans le but de caractériser leur comportement mécanique. Les essais sont également contrôlés en ouverture d'entaille (vitesse de 0,05 $\mu\text{m/s}$) et sont conduits jusqu'à rupture.

2.3. Instrumentation émission acoustique

Dans le but de suivre et de caractériser le processus de fissuration, toutes les éprouvettes sont instrumentées d'un système d'émission acoustique (AE), pendant les périodes de pré-fissuration et de rechargement après vieillissement. Le but de cette instrumentation est de localiser les microfissures (appelées événements acoustiques) qui apparaissent pendant les essais. L'instrumentation AE comprend un système MISTRAS à huit voies et une carte DISP pour l'extraction des paramètres AE (tels que l'amplitude, l'énergie, la durée...). Quatre transducteurs piézoélectriques (type R15, avec une fréquence de résonance de 150 kHz) sont placés sur les éprouvettes juste au dessus de l'entaille, afin d'entourer la zone de microfissuration, et de minimiser les erreurs dans les algorithmes de localisation. Les transducteurs forment une zone rectangulaire de 140 x 65 mm² (voir figure 2). Ils sont placés sur une face de l'éprouvette, et couplés au matériau avec une colle silicone. Les signaux détectés sont amplifiés à l'aide d'amplificateurs de gain 40 dB. La valeur seuil de détection en amplitude est fixée à 30 dB de façon à s'affranchir du bruit ambiant, et seuls les signaux de fréquence comprise entre 20 et 400 kHz sont détectés.

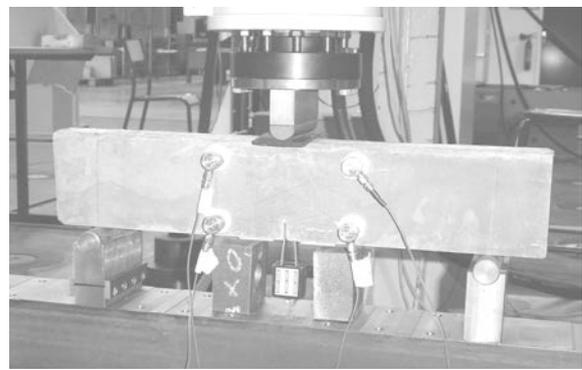
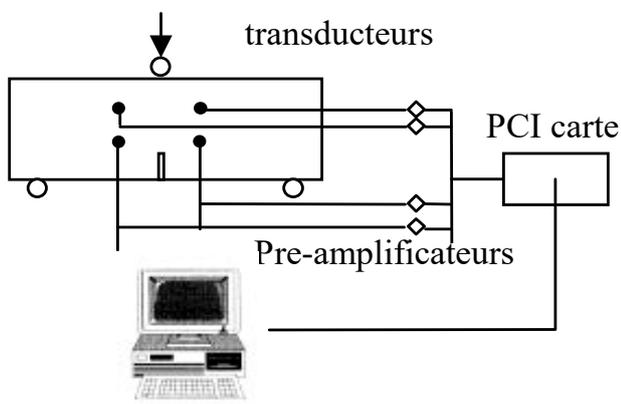


Figure 2. *Instrumentation émission acoustique – Maille de localisation de 140 x 65 mm²*

Un algorithme de localisation planaire est utilisé pour la localisation et l'obtention des cartes de microfissuration. Il est basé sur la triangulation des différences entre temps de détection des événements acoustiques par chaque capteur. Trois transducteurs sont suffisants, mais la précision de localisation est améliorée avec un transducteur supplémentaire. Avant les essais, cette précision est vérifiée. Un événement est généré, avec une source Hsu-Nielsen standard, à plusieurs endroits sur la surface instrumentée de l'éprouvette, et la position calculée est comparée avec la position réelle de l'événement. Pour le béton utilisé dans cette étude, la précision de localisation est de ± 3 mm, ce qui est correct compte tenu de la taille des capteurs (15 mm de diamètre). Des simulations identiques peuvent être réalisées sur la face opposée de l'éprouvette (non instrumentée) et donnent la même précision. Cela nous permet de nous affranchir de la largeur de l'éprouvette et donc d'obtenir des cartes de localisation 2D.

3. Caractérisation mécanique de l'auto-cicatrisation des fissures

Trois types de résultats mécaniques sont présentés sur la figure 3. Ce sont les courbes pour une éprouvette préfissurée et rechargée immédiatement (essai de référence réalisé afin de caractériser le comportement mécanique d'une éprouvette fissurée non vieillie), et pour des éprouvettes fissurées et vieilles 3 semaines (avant rechargement) dans l'air et dans l'eau respectivement. L'intérêt est de montrer l'effet de l'immersion dans l'eau, en comparaison avec le vieillissement dans l'air et le rechargement classique sans vieillissement. Les courbes représentent la force appliquée en fonction de l'ouverture d'entaille.

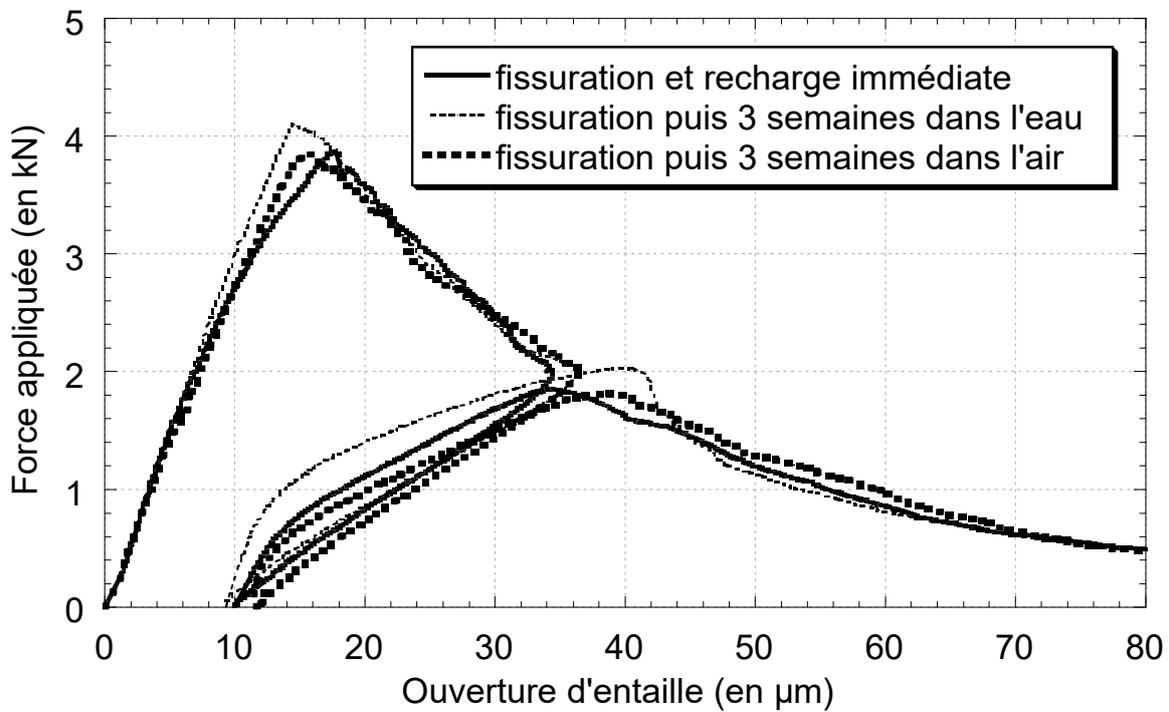


Figure 3. *Comportement mécanique pour une éprouvette fissurée et immédiatement rechargée, pour une éprouvette fissurée et vieillie 3 semaines dans l'eau avant rechargement, et pour une éprouvette vieillie 3 semaines dans l'air avant rechargement – Préfissuration et rechargement*

Chaque courbe présente deux parties : la phase de préfissuration, consistant en la charge puis la décharge quand la charge appliquée atteint 2 kN en phase post-pic, et la phase de rechargement, immédiate ou après vieillissement. Cette figure montre que l'éprouvette fissurée et immédiatement rechargée, et l'éprouvette fissurée et vieillie dans l'air, ont exactement le même comportement mécanique lors de la phase de rechargement, qui correspond donc au rechargement classique après fissuration. Il y a, au contraire, une évolution de ce comportement mécanique pour l'éprouvette fissurée conservée dans l'eau. Ce résultat montre donc bien l'importance de la présence de l'eau pour l'occurrence du phénomène étudié.

L'influence du temps de vieillissement est également un paramètre important. Les figures 4 à 8 présentent les courbes moyennes de recharge pour les éprouvettes vieillies dans l'air et dans l'eau, pour les 5 périodes allant de 1 à 20 semaines. La reproductibilité des phases de préfissuration pouvant être remarquée sur la figure 3, uniquement la partie des résultats correspondant à la phase de rechargement est présentée, afin de caractériser l'évolution de ce comportement mécanique. L'ouverture d'entaille au début de l'essai de rechargement est initialisée à 0.

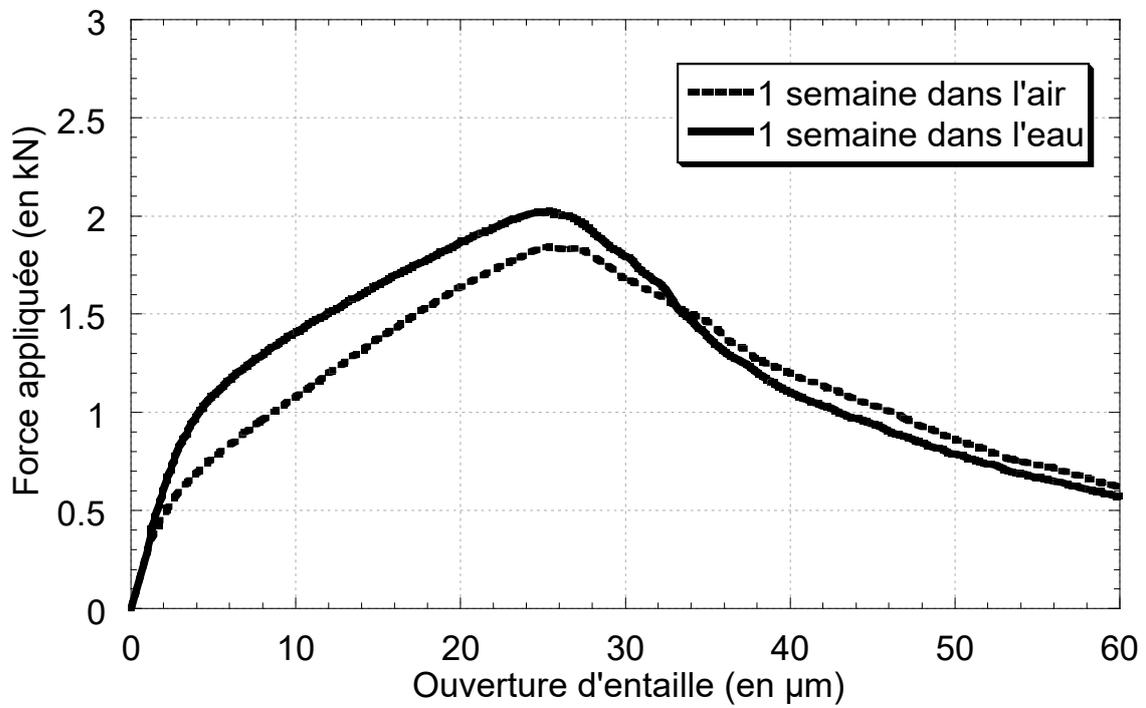


Figure 4. Comportement mécanique moyen lors de la phase de rechargement pour les éprouvettes vieilles pendant 1 semaine, respectivement dans l'air et dans l'eau

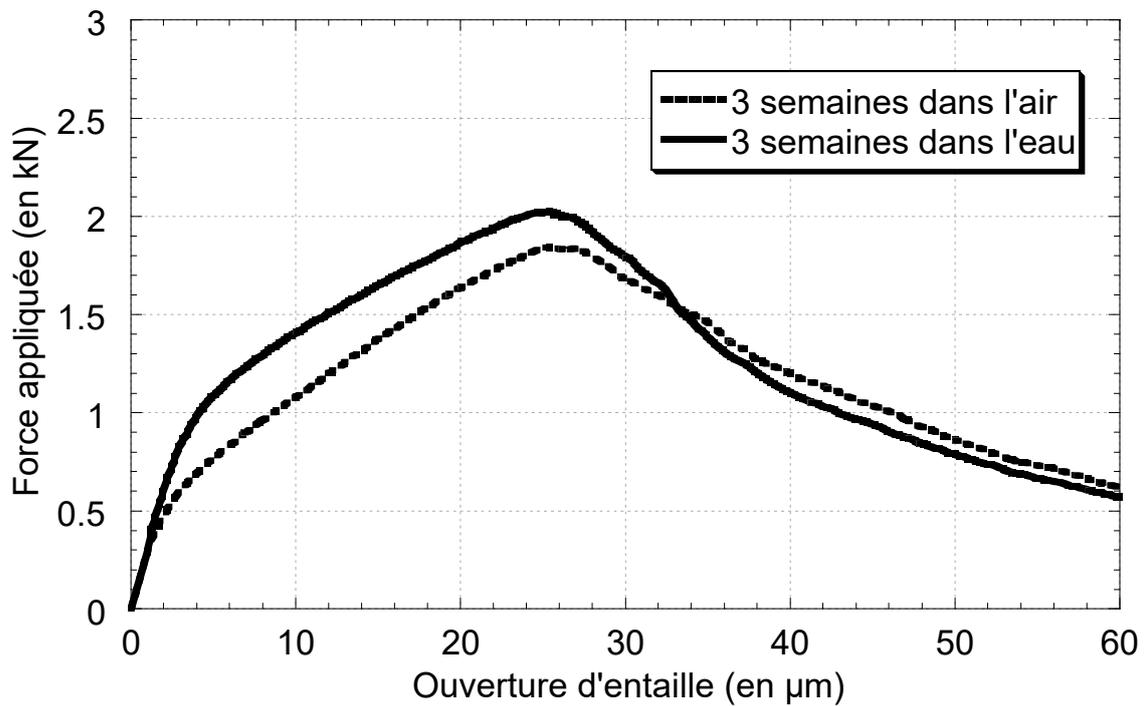


Figure 5. Comportement mécanique moyen lors de la phase de rechargement pour les éprouvettes vieilles pendant 3 semaines, respectivement dans l'air et dans l'eau

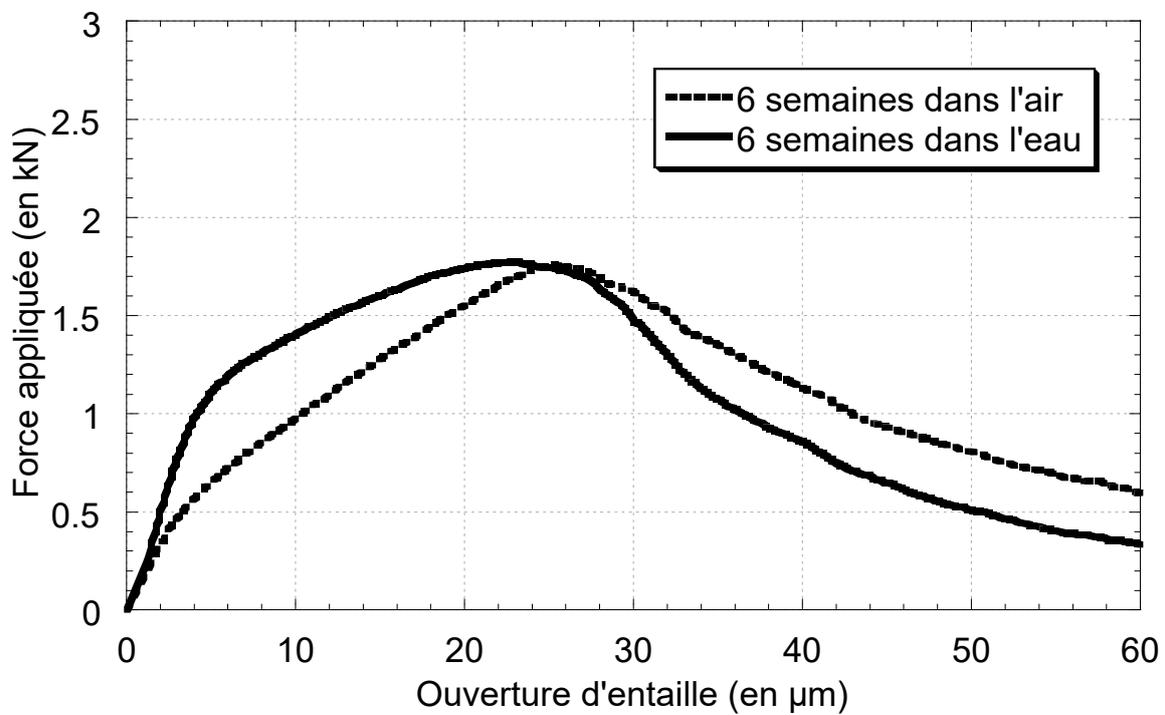


Figure 6. Comportement mécanique moyen lors de la phase de rechargement pour les éprouvettes vieilles pendant 6 semaines, respectivement dans l'air et dans l'eau

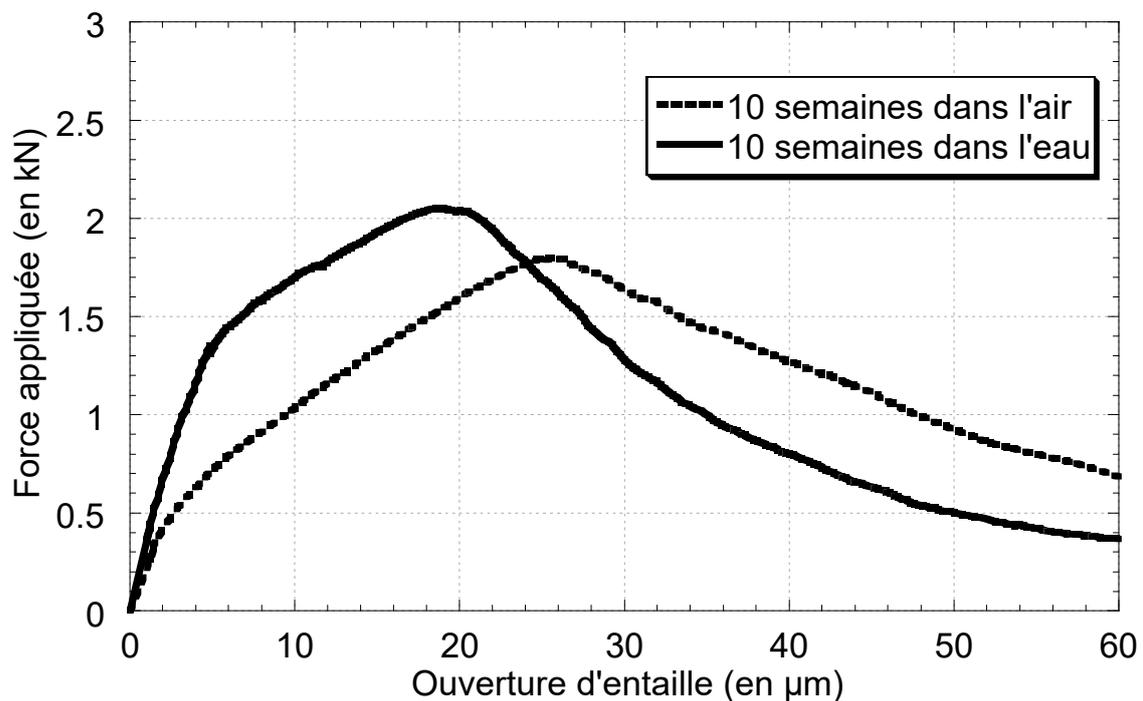


Figure 7. Comportement mécanique moyen lors de la phase de rechargement pour les éprouvettes vieilles pendant 10 semaines, respectivement dans l'air et dans l'eau

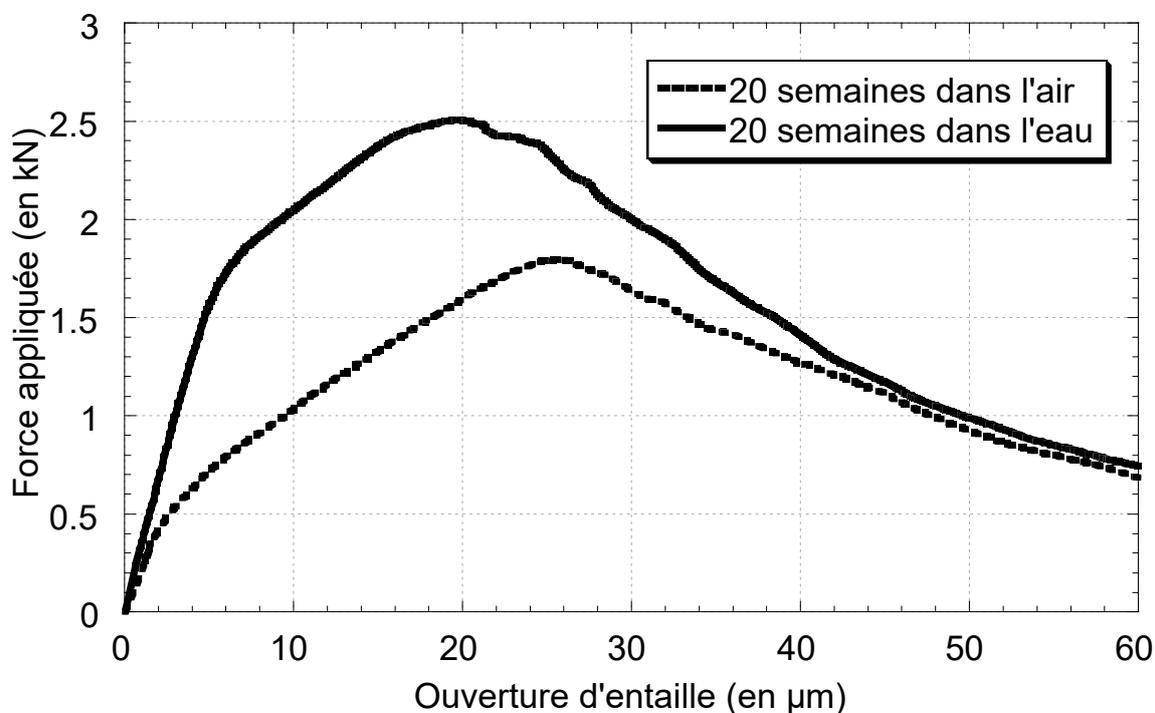


Figure 8. *Comportement mécanique moyen lors de la phase de rechargement pour les éprouvettes vieillies pendant 20 semaines, respectivement dans l'air et dans l'eau*

On peut ainsi remarquer que les éprouvettes vieillies dans l'air ont exactement le même comportement mécanique lors de la phase de rechargement, pour les 5 périodes de vieillissement. Cela signifie que l'air n'a aucune influence sur les propriétés mécaniques des éprouvettes de béton fissurées. Au contraire, il y a une évolution très nette du comportement mécanique après vieillissement dans l'eau, avec le temps. La principale différence réside dans une reprise de raideur globale des éprouvettes, et dans une légère reprise de capacité portante, croissante avec le temps.

Afin d'avoir la confirmation que ces résultats mécaniques sont dus à la cicatrisation de la fissure initialement créée pendant la phase de préfissuration et non à l'évolution du béton lui-même par effet de cure dans l'eau, un essai de référence est réalisé, consistant à vieillir une éprouvette non fissurée pendant 10 semaines dans l'eau, puis à la préfissurer et à la recharger immédiatement. La figure 9 montre le résultat mécanique de cet essai en comparaison avec le comportement mécanique d'une éprouvette préfissurée et vieillie 10 semaines dans l'eau avant rechargement. Elle montre clairement que l'immersion dans l'eau n'améliore en rien les propriétés mécaniques d'une éprouvette saine. Il n'y a pas d'effet de cure, ce qui est une conséquence du traitement thermique appliqué aux éprouvettes. Le gain de raideur établi pour les éprouvettes fissurées et vieillies dans l'eau est donc bien imputable au phénomène d'auto-cicatrisation des fissures.

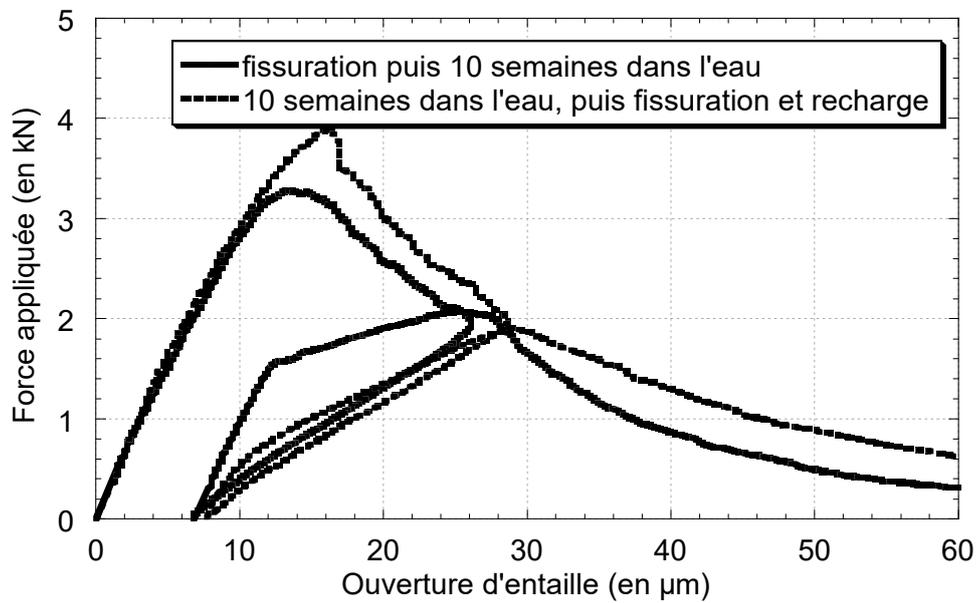


Figure 9. Comportement mécanique d'une éprouvette référence (vieillie dans l'eau 10 semaines sans fissure, puis fissurée et rechargée immédiatement) et d'une éprouvette fissurée puis vieillie 10 semaines dans l'eau avant rechargement

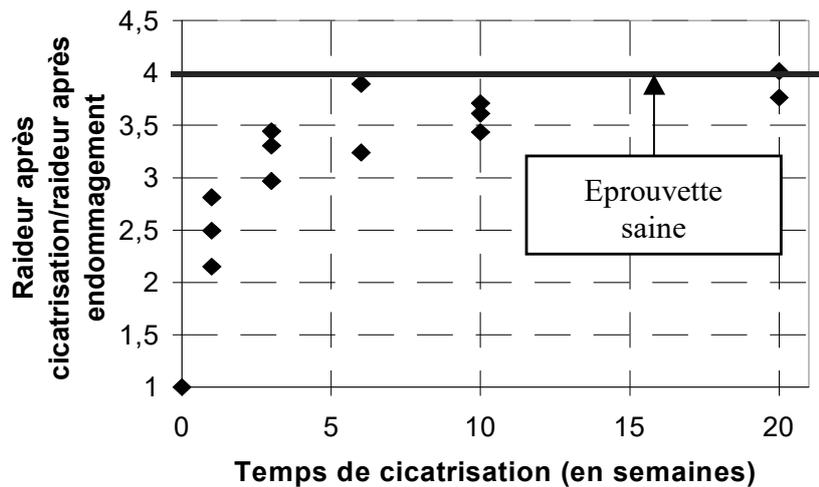


Figure 10. Evolution du rapport raideur globale après cicatrisation /raideur globale après endommagement et sans cicatrisation

La figure 10 montre l'évolution du rapport entre la raideur globale après cicatrisation et la raideur globale après endommagement et sans cicatrisation, en fonction du temps de vieillissement. Les raideurs sont calculées entre 0,4 kN et 0,8 kN. On peut noter qu'il y a une reprise très rapide de raideur globale, et que cette raideur globale tend vers celle des éprouvettes non endommagées, pour lesquelles le ratio est représenté par le trait continu sur le graphe. Ces résultats peuvent être expliqués par le fait que de nouveaux cristaux se forment dans la fissure, et principalement, si l'on considère le faible rapport E/C, de nouveaux CSH. Ces cristaux forment un lien entre les deux lèvres de la fissure et la remplissent

progressivement. La raideur de ces cristaux est certainement assez proche de celle des CSH issus de l'hydratation primaire, et on peut penser que lorsque la fissure est comblée par ces cristaux (pour 10 semaines peut être, par exemple), la raideur globale de l'éprouvette cicatrisée atteint celle de l'éprouvette saine.

Concernant la capacité portante en flexion, la figure 11 représente l'évolution en fonction du temps de vieillissement, de la force au pic pendant la phase de rechargement pour les éprouvettes conservées dans l'eau, donc cicatrisées. Elle montre que l'auto-cicatrisation provoque une légère augmentation de la résistance en flexion avec le temps de cicatrisation, en comparaison avec la résistance d'éprouvettes non cicatrisées. Néanmoins, la résistance des éprouvettes saines n'est pas atteinte. Cela peut être expliqué par le fait que les cristaux formés créent un lien entre les deux lèvres de la fissure, mais ne reconstituent pas la structure complexe qui donne sa résistance au béton, notamment l'enchevêtrement entre CSH.

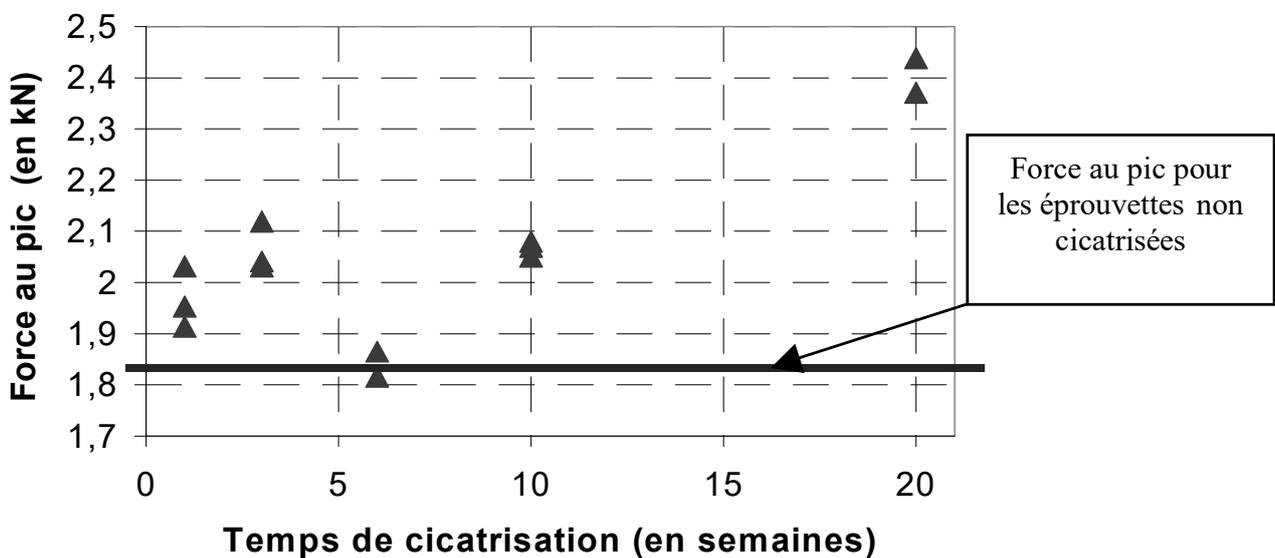


Figure 11. Evolution de la force au pic de rechargement pour les éprouvettes cicatrisées, en fonction du temps de cicatrisation

4. Analyse par émission acoustique

Les essais mécaniques ont montré la contribution du phénomène d'auto-cicatrisation dans l'amélioration des propriétés mécaniques d'éprouvettes initialement endommagées. Le principal objectif des tests acoustiques réalisés est maintenant de mettre en évidence que cette contribution est bien liée à la précipitation de nouveaux cristaux dans la fissure, en montrant la microfissuration de ces cristaux pendant la phase de rechargement des essais mécaniques. Des cartes de microfissuration sont donc réalisées pendant les 2 étapes des essais de flexion 3 points, la phase de pré-fissuration, et la phase de rechargement après vieillissement. Le premier type de cartes est nécessaire pour localiser la fissure avant cicatrisation.

La figure 12 présente la carte de microfissuration typique d'une éprouvette, après la phase de préfissuration. Les 4 points dans les angles représentent les transducteurs qui forment la zone rectangulaire de localisation, et les autres points représentent les microfissures détectées.

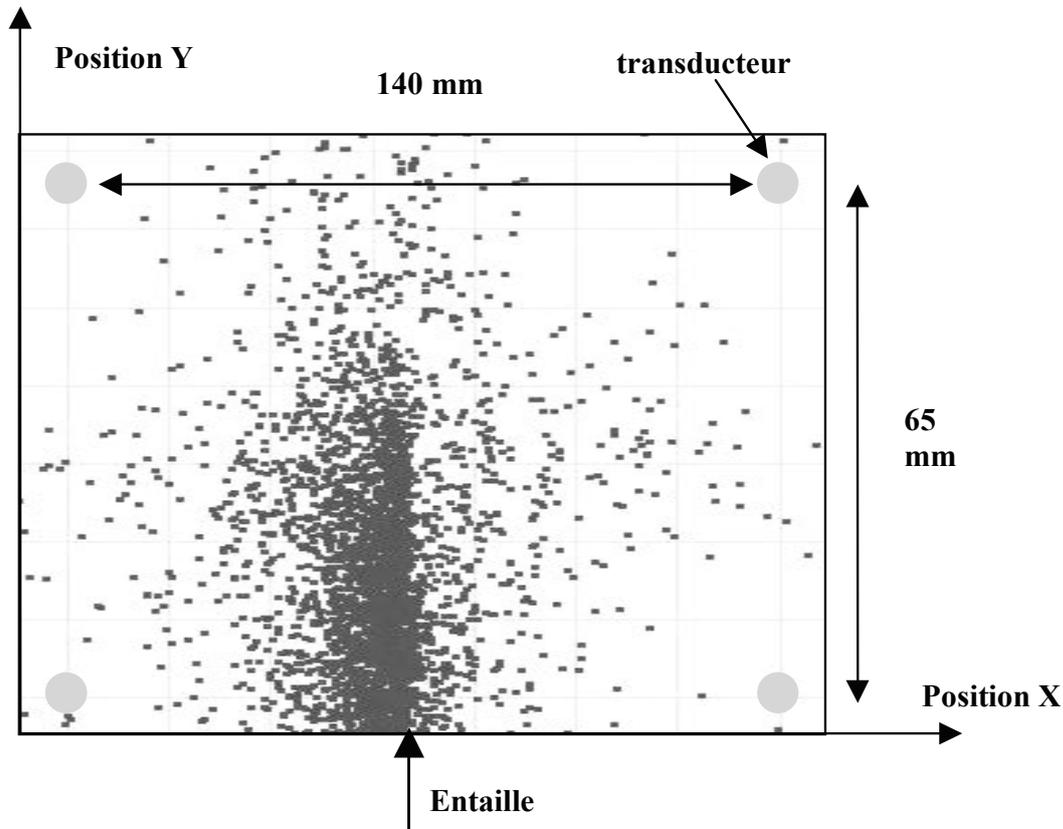


Figure 12. Carte de localisation brute de la microfissuration après la phase de préfissuration

On peut observer une zone très dense de microfissures autour de la fissure macroscopique. Dans le but d'obtenir une localisation plus précise de cette macrofissure, qui est d'intérêt puisque l'on souhaite localiser la microfissuration de cristaux à l'intérieur de cette fissure, un traitement de ces données est nécessaire. Otsuka (Otsuka, 2000) a montré que 95 % de l'énergie acoustique dissipée pendant la fissuration était localisé dans la zone d'adoucissement, et que les microfissures de forte énergie se trouvaient au niveau de la macrofissure. Ainsi, nous avons décidé d'éliminer les événements dont l'énergie est inférieure à 2 % de l'énergie de la microfissure la plus énergétique. Un filtre en énergie est donc établi à 1 000 atto Joules. L'énergie cumulée de tous ces événements filtrés est évidemment non négligeable, mais ce critère permet de conserver uniquement les microfissures qui sont proches de la macrofissure. La figure 13 présente exactement le même résultat que la figure 8 après avoir appliqué le filtre. Nous pouvons ainsi voir clairement où se situe la macrofissure.

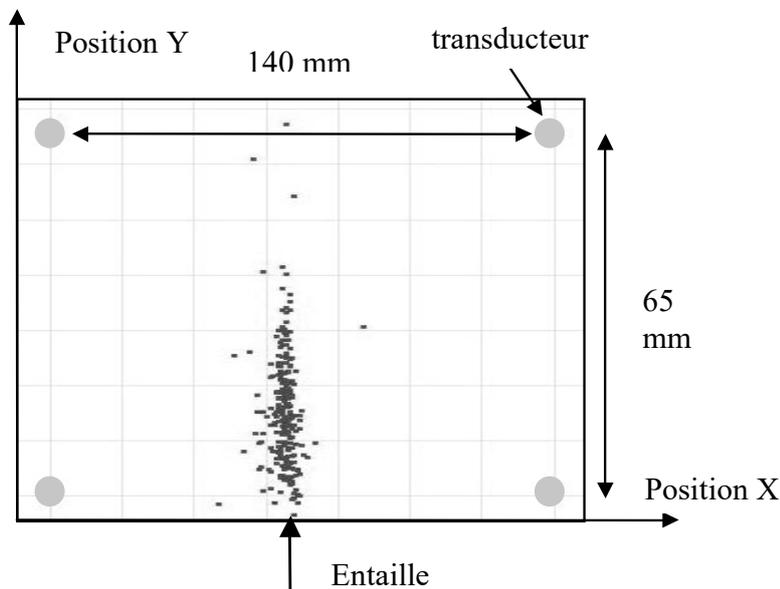


Figure 13. Carte de localisation de la microfissuration après la phase de préfissuration – Microfissures d'énergie supérieure à 1 000 atto Joules

Le même type de cartes de localisation est obtenu lors de la phase de rechargement pour les éprouvettes vieilles, en appliquant aussi le filtre en énergie. Dans une première analyse, ces cartes sont réalisées en phase prépic jusqu'à 18 μm d'ouverture d'entaille. Les figures 14 et 15 présentent les cartes pour une éprouvette vieillie dans l'eau, et pour une éprouvette vieillie dans l'air, les deux pendant 10 semaines.

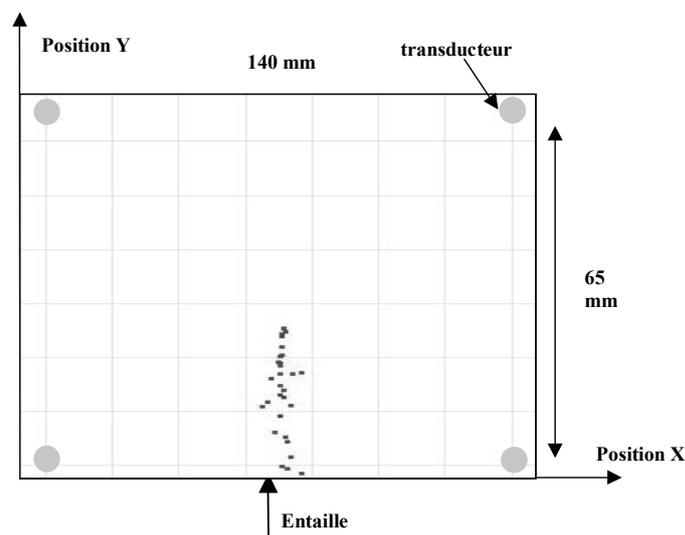


Figure 14. Carte de microfissuration, pendant la phase de rechargement (phase prépic jusqu'à 18 μm), pour une éprouvette vieillie 10 semaines dans l'eau

On peut ainsi noter que des microfissures apparaissent pour l'éprouvette vieillie dans l'eau au niveau de la fissure initialement créée alors que très peu de microfissures sont détectées pour l'éprouvette vieillie dans l'air. On a donc dans un cas l'endommagement des cristaux nouvellement formés et dans l'autre cas, la

réouverture de la fissure existante sans endommagement, mais avec éventuellement quelques frottements détectés. Ces résultats confirment bien que de nouveaux cristaux ont précipité dans la fissure pendant le vieillissement dans l'eau, et qu'ils commencent à être endommagés dans la phase prépic du rechargement.

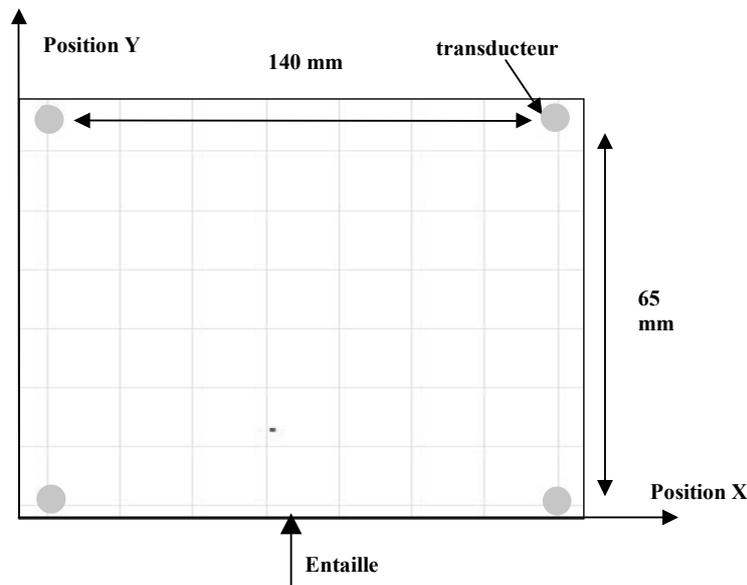


Figure 15. Carte de microfissuration, pendant la phase de rechargement (phase prépic jusqu'à $18 \mu\text{m}$), pour une éprouvette vieillie 10 semaines dans l'air

5. Conclusion

Dans cette étude, les résultats d'une campagne expérimentale sur le comportement mécanique d'éprouvettes de béton auto-cicatrisées sont présentés. Après avoir été pré-fissurées de façon contrôlée en flexion 3 points, des éprouvettes prismatiques sont vieillies, respectivement dans l'air et dans l'eau, pour des durées variant de 1 à 20 semaines. Il apparaît qu'après conservation dans l'eau exclusivement, les éprouvettes endommagées tendent à reprendre rapidement leur raideur globale initiale, et à améliorer légèrement leur capacité portante en flexion. Le béton étudié possède une importante quantité de ciment anhydre au sein de sa microstructure, et ces observations mécaniques sont corrélées à l'auto-cicatrisation des fissures, principalement par hydratation de clinker anhydre sur les lèvres des fissures. La reprise de raideur peut alors être liée au remplissage progressif de la fissure par de nouveaux cristaux issus de ces réactions de cicatrisation, cristaux dont la raideur est sans doute peu éloignée de celle des CSH formés par l'hydratation classique. La légère amélioration de capacité portante peut, elle, être expliquée par le développement progressif des propriétés mécaniques de ces nouveaux cristaux ou des propriétés mécaniques de la zone de transition entre nouveaux cristaux et CSH primaires. Parallèlement à ces essais mécaniques, une analyse par émission acoustique est conduite pour confirmer la précipitation de nouveaux cristaux dans la

fissure créée. Le processus de fissuration d'éprouvettes cicatrisées est ainsi suivi et permet la localisation de la microfissuration de ces cristaux pendant les essais de flexion 3 points. Ce travail de recherche doit maintenant être complété par l'étude de l'influence de paramètres tels que largeur de fissure ou composition du béton, sur le phénomène, et par des observations microscopiques permettant de clarifier les mécanismes physiques et chimiques entrant en jeu pendant le processus d'auto-cicatrisation.

6. Bibliographie

- Acker P., "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, 2001.
- Acker P., "Swelling, shrinkage and creep: a mechanical approach to cement hydration", *Concrete Science & Engineering*, vol. 37, 2004, p. 237-243.
- Edvardsen C., "Water permeability and autogenous healing of cracks in concrete", *ACI Material Journal*, vol. 96, n° 4, 1999, p. 448-454.
- Hearn N., "Self-healing property of concrete – Experimental evidence", *Materials and Structures*, vol. 30, 1997, p. 404-411.
- Hearn N., "Self-sealing, autogenous healing and continued hydration: what is the difference?", *Materials and Structures*, vol. 31, 1998, p. 563-567.
- Jacobsen S., Marchand J., Hornain H., "Sem observations of the microstructure of frost deteriorated and self-healed concrete", *Cement and Concrete Research*, vol. 25, n° 8, 1995, p. 55-62.
- Jacobsen S., Sellevold E., "Self-healing of high strength concrete after deterioration by freeze/thaw", *Cement and Concrete Research*, vol. 26, n° 1, 1996, p. 55-62.
- Loukili A., Richard P., Lamirault J., "A study on delayed deformations of an ultra high strength cementitious material", *ACI SP179-59, Recent Advances in Concrete Technology*, vol. 179, 1998.
- Neville A., "Autogenous healing – A concrete miracle?", *Concrete International*, novembre 2002, p. 76-82.
- Otsuka K., Date H., "Fracture process zone in concrete tension specimen", *Cement and Concrete Research*, vol. 65, n° 2-3, 2000, p. 111-131.
- Pimienta P., Chanvillard G., "Retention of the mechanical performances of Ductal® specimens kept in various aggressive environments", *Fib - Symposium 2004*, Avignon, 2004.
- Reinhardt H.W., Joos M., "Permeability and self-healing of cracked concrete as a function of temperature and crack width", *Cement and Concrete Research*, vol. 33, n° 7, 2003, p. 981-985.