



HAL
open science

Analyse croisée et modélisation multi-échelle de l'auto-cicatrisation des matériaux cimentaires

Benoit Hilloulin

► **To cite this version:**

Benoit Hilloulin. Analyse croisée et modélisation multi-échelle de l'auto-cicatrisation des matériaux cimentaires. Rencontres Universitaires de Génie Civil, May 2015, Bayonne, France. hal-01167584

HAL Id: hal-01167584

<https://hal.science/hal-01167584>

Submitted on 24 Jun 2015

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.

Analyse croisée et modélisation multi-échelle de l'auto-cicatrisation des matériaux cimentaires

Benoît Hilloulin^{1,2}

¹ LUNAM Université, Ecole Centrale de Nantes, Institut de Recherche en Génie Civil et Mécanique (GeM), UMR-CNRS 6183, 1 rue de la Noë, 44321 Nantes

² Magnel Laboratory for Concrete Research, Ghent University, Technologiepark Zwijnaarde 904, B-9052 Gand, Belgique

emails : benoit.hilloulin@ec-nantes.fr, benoit.hilloulin@ugent.be

Prix Jeunes Chercheurs « René Houpert »

RÉSUMÉ. Pour les structures en béton, les fissures sont des causes de diminution de la durée de vie et de pertes des propriétés mécaniques. L'auto-cicatrisation des fissures pourrait représenter un bon moyen de réaliser des économies importantes sur les coûts de réparation et d'entretien.

Dans cette étude nous nous intéressons au phénomène d'auto-cicatrisation naturel des matériaux cimentaires par la mise au point de protocoles expérimentaux innovants complétés par des modèles numériques explicatifs. Il apparaît que l'âge de fissuration influence grandement les regains mécaniques notamment en terme de résistance maximale, ce qui est confirmé par le modèle micro-mécanique développé. Pour une fissuration tardive, le comblement de la fissure par la calcite peut être apprécié par une nouvelle technique non-destructive basée sur l'interférométrie de la coda qui permet la détection de fissures fines jusqu'à environ 20 μm . Enfin, un modèle de transport réactif inédit met en lumière les principaux paramètres influençant la cinétique et les limites de ce phénomène.

ABSTRACT. In concrete structures, cracks engender service life decrease and loss of mechanical properties. Self-healing of cracks could represent a way to realise considerable savings on reparation and maintenance costs.

In this study, natural self-healing phenomenon of cementitious materials is investigated through the design of innovative experimental protocols, in addition with explicative numerical models. It is emphasized that the age at cracking mostly influences mechanical regains and more specifically resistance regains, which is confirmed by the micro-mechanical model developed. When crack appears later, crack filling with calcite can be detected by a novel non-destructive technique based on coda wave interferometrie, which can allow the detction of closed cracks with a width down to around 20 μm . Moreover, a reactive transport model highlights the most influencing parameters on the kinetics and the limits of the phenomenon.

MOTS-CLÉS : auto-cicatrisation, fissure, béton, microstructure, contrôle non-destructif, modélisation.

KEYWORDS: self-healing, cracks, concrete, microstructure, non-destructive testing, modelling.

1. Introduction

Dans les matériaux cimentaires, les fissures, généralement maîtrisées, n'en perdent pas moins leur caractère néfaste puisqu'elle représentent un chemin d'entrée privilégié pour les agents agressifs et peuvent réduire la résistance structurelle. Ainsi l'utilisation du phénomène d'auto-cicatrisation pourrait être un bon moyen de réaliser des économies très importantes en prolongeant la durée de service des structures, en plus de diminuer l'impact écologique du secteur du Génie Civil [ROO 13].

Le phénomène d'auto-cicatrisation intervient naturellement en présence d'eau et conduit au comblement partiel ou total des fissures les plus étroites par poursuite d'hydratation [LAU 56] et/ou précipitation de carbonate de calcium [EDV 99]. Cependant, il reste limité aux fissures d'une largeur maximale de l'ordre de 100 - 200 μm . C'est pourquoi des produits (capsules, bactéries) sont développés afin d'espérer cicatrifier les fissures les plus larges [HIL 15]. Le développement de ces produits doit toutefois se faire en parallèle d'une compréhension plus poussée du phénomène naturel. En effet, ces produits représentent un surcoût à la construction qui limite considérablement leur utilisation. De plus, le développement de solutions artificielles pourrait se nourrir des phénomènes naturels, tel le bio-mimétisme.

L'auto-cicatrisation naturelle, nommée *autogène*, a été observée dès le XIX^{ème} siècle. Au début du XX^{ème} siècle, quelques travaux ont souligné la possibilité de regains mécaniques, les attribuant à la probable reprise d'hydratation des anhydres à proximité de la fissure [LAU 56]. Malheureusement, les fortes disparités entre les différentes études aboutirent à une compréhension parcellaire du développement du phénomène, de sa cinétique et des différentes espèces impliquées. Seuls quelques travaux récents ont commencé la formalisation du phénomène à partir de bétons à hautes performances contenant une part importante d'anhydres [PIM 05, GRA 06, GRA 07]. L'intérêt grandissant porté au phénomène à partir des années 1990 s'est principalement orienté sur les regains d'imperméabilité par précipitation de calcite pour des rapports eau sur ciment (E/C) supérieurs à 0,4 [EDV 99, RAN 13]. De nombreuses études expérimentales ont été effectuées soulignant quelques paramètres influents comme la largeur initiale de fissure et la composition, mais, à notre connaissance, aucun modèle n'a été développé pour tenter de confirmer ou expliquer ces observations. Depuis une dizaine d'années, des techniques de suivi non-destructif du phénomène ont été proposées pour compléter les observations microscopiques surfaciques et dans le but de répondre aux futurs besoins *in situ* d'auscultation de zones de structures non accessibles. La précision de telles méthodes et de leur capacité à suivre le phénomène reste toutefois à améliorer [IN 13].

Dans cette étude, résumant les travaux effectués au cours de ma thèse, des méthodes originales sont présentées. Les expériences réalisées et les modèles développés livrent des informations sur les conditions de développement et la cinétique du phénomène. Un intérêt tout particulier est porté aux regains mécaniques possibles [HIL 14a]. Enfin, le développement d'une technique non-destructive innovante pour la caractérisation fine de l'état de fissuration d'un échantillon et le suivi du phénomène d'auto-cicatrisation est présentée [HIL 14b].

2. Protocole expérimental

2.1. Matériaux

Des éprouvettes de mortier de dimensions $7 \times 7 \times 28$ (cm^3) sont fabriquées avec un ciment CEMI 42.5 N et un sable de mer 0/2, afin d'obtenir un rapport E/C de 0,35 et un volume de pâte de 500 l/m^3 . Après une cure isolées du milieu ambiant de 24 h, à une température de 20°C , les éprouvettes sont démoulées. Des entailles de 5 mm de large et 7 mm de haut sont sciées au centre des éprouvettes, puis les éprouvettes sont immergées dans de l'eau courante à 20°C jusqu'à fissuration. Un soin particulier est apporté à la vibration des éprouvettes destinées aux mesures non-destructives afin qu'elles soient le plus homogène possible et sans défaut.

2.2. Fissuration et cicatrisation des mortiers

Les éprouvettes sont fissurées par un essai de flexion 3 points piloté en ouverture de fissure (CMOD) pour obtenir la largeur de fissure désirée, variant entre environ 10 et environ 50 micromètres à la base de la fissure. Cette ouverture de fissure initiale est mesurée au microscope optique puis, la mesure est éventuellement répétée au même endroit pour les éprouvettes suivies dans le temps. La cicatrisation est effectuée par immersion dans de l'eau courante ou dans de l'eau chargée en CO_2 à 20°C .

2.3. Détermination des regains mécaniques

Afin de déterminer les regains mécaniques associés à la cicatrisation, les courbes de rechargement des éprouvettes préalablement pré-fissurées puis cicatrisées sont comparées aux courbes de chargement des éprouvettes de référence non fissurées ayant subi les mêmes conditions de cure. Pour quantifier les regains, deux types de ratios sont calculés par rapport à la référence : les ratios de résistance ($F_{Cicatrisé}/F_{Ref}$) et les ratios de rigidité ($K_{Cicatrisé}/K_{Ref}$). Ces ratios sont comparés à des ratios pseudos-représentatifs d'un état non cicatrisé, calculés à partir de la courbe de rechargement de la référence pour une largeur de fissure égale à la largeur de fissure des éprouvettes pré-fissurées (voir Figure 1(a)).

2.4. Observation microscopique du comblement des fissures

Pour les éprouvettes dont on suit l'évolution de la largeur de fissure, des marquages sont réalisés sur leur surface afin de garantir une référence non altérée par la cicatrisation. Avant observation, les éprouvettes sont séchées à l'air libre pour minimiser l'impact de l'eau sur le gonflement des lèvres de fissures, et assurer un contraste correct des images. La largeur de fissure est mesurée perpendiculairement aux lèvres grâce à un grossissement $\times 100$ qui garantit une précision de l'ordre du micromètre comme illustré Figure 1(b). Des éprouvettes sont aussi plongées dans de l'eau chargée en CO_2 pour étudier une possible influence sur la cicatrisation.

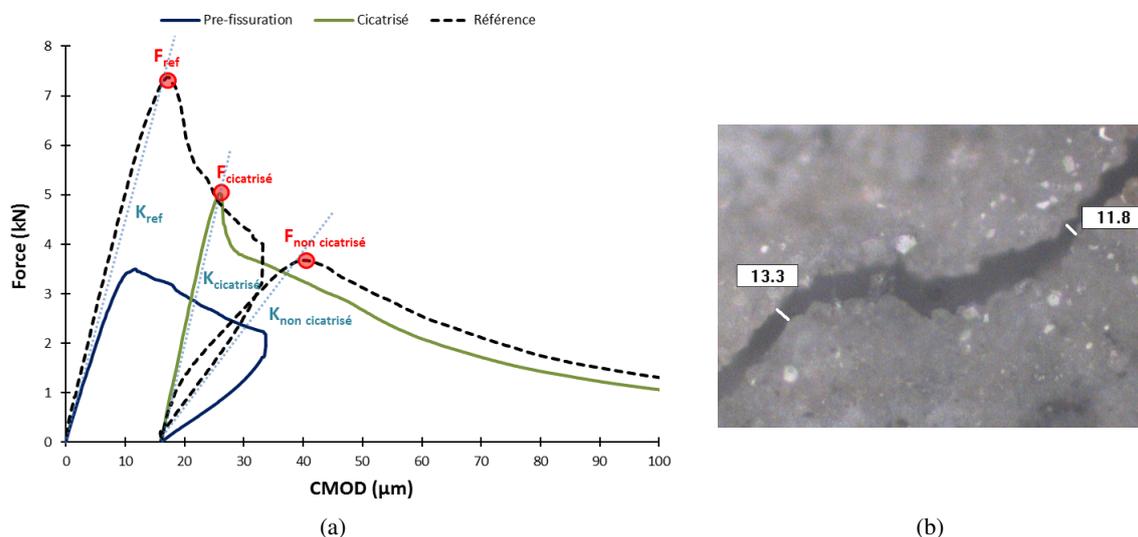


Figure 1. Principe de détermination des regains mécaniques à partir des courbes de flexion (a), et principe de mesure microscopique de la largeur de fissure pour une éprouvette en cours de cicatrisation (b).

2.5. Caractérisation non-destructive

Afin de caractériser la fissuration et l'éventuelle cicatrisation des éprouvettes, une technique basée sur l'interférométrie des ondes de coda modulées par une pompe acoustique en régime non linéaire est utilisée [HIL 14b]. Les éprouvettes sont équipées de capteurs comme illustré dans la Figure 2(a) : un émetteur d'ondes hautes fréquences est positionné d'un côté de la fissure, alors que le récepteur est placée de l'autre côté. Une pastille piézoélectrique, sollicitée à une fréquence plus basse, est placée sur le côté de l'échantillon afin d'induire une excitation globale de l'échantillon (onde de pompe) renforçant l'impact des non-linéarités sur les observables ultrasonores (alors que sans cette excitation, un chargement mécanique est généralement nécessaire pour induire des non-linéarités suffisantes).

En analysant les signaux reçus, plus spécifiquement la partie finale du signal nommée « coda » plus sensible au décalage temporel du fait de la multiple diffusion qui engendre des trajets beaucoup plus longs que ceux des ondes balistiques, la variation de vitesse α des ondes, due au changement d'état du matériau entre l'instant non excité et l'instant excité, est sensible et peut être quantifiée [SNI 02, ZHA 12]. Pour cela, la méthode de « Stretching » est utilisée. Le signal temporel de référence $h_0[t]$ est contracté ou dilaté suivant un taux $\tau_i = \delta v_i/v_0$ (Figure 2(b)). Le

coefficient de corrélation $CC_{(h_0, h_1)}^{(t_1, t_2)}(\tau_i)$ entre le signal de référence dilaté ou contracté $h_0[t(1 + \tau_i)]$ et le signal reçu $h_1[t]$ lorsque la matériau évolue suite à la sollicitation, est maximisé en fonction de τ_i afin de déterminer la variation de vitesse effective $\alpha = (v_1 - v_0)/v_0 = \delta v/v_0$. Les résultats sont ensuite comparés à ceux obtenus par suivi microscopique.

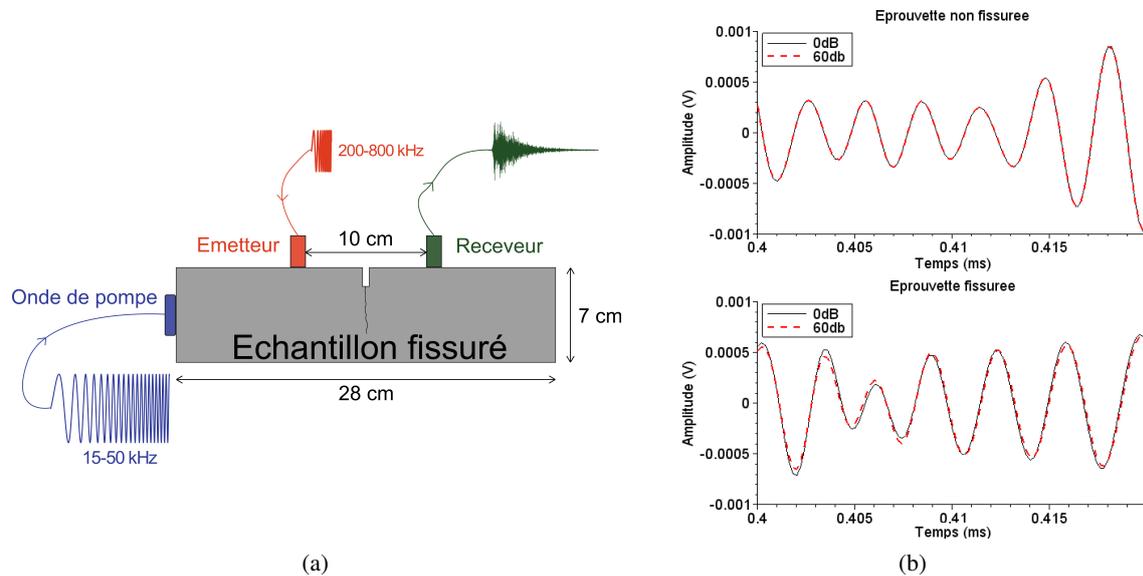


Figure 2. Schéma du dispositif expérimental de contrôle non-destructif (a), et mise en évidence du décalage du signal coda induit par la présence d'une fissure suivant le niveau d'excitation (comparaison d'une éprouvette non-fissurée (haut) et fissurée (bas))(b)

3. Modèles numériques

3.1. Modèle mésoscopique de caractérisation des regains mécaniques

Afin d'obtenir des premières informations sur les propriétés mécaniques des produits de cicatrisation et leur localisation, un modèle mécanique mésoscopique a été développé dans le code éléments finis Cast3M [HIL 14a]. La pré-fissuration, la cicatrisation et le rechargement d'éprouvettes sont simulés consécutivement. Les paramètres du matériau sain sont ajustés pour que la courbe de pré-fissuration corresponde aux données expérimentales obtenues par [GRA 07] via l'utilisation d'un modèle d'endommagement microplan. Ensuite un modèle chemo-hydro-mécanique décrit l'étape de cicatrisation par diffusion d'eau, hydratation locale des anhydres et, consécutivement, la diminution locale de l'endommagement (équation 1 ou k est un facteur multiplicatif, représentant l'influence des nouveaux hydrates sur les regains). Ainsi, à la fin de l'étape de cicatrisation, une nouvelle carte d'endommagement de l'éprouvette est obtenue (Figure 3(a)). L'étape de rechargement permet alors d'obtenir le comportement mésoscopique d'une éprouvette cicatrisée. L'utilisation du modèle pour réaliser l'analyse inverse des résultats expérimentaux donne des informations sur les produits de cicatrisation.

$$d_{final} = d_{initial} - k \times \frac{V_{hydrates}}{V_{total}} \quad (1)$$

3.2. Modèle micro-mécanique de poursuite de l'hydratation

Dans le but de mieux comprendre le développement du phénomène de cicatrisation par reprise d'hydratation et les regains mécaniques associés à l'échelle microscopique, une adaptation du code d'hydratation CEMHYD3D (NIST) a été réalisée. Cette adaptation repose sur la prise en compte de la présence continue d'eau dans la fissure, le code d'origine gérant la dissolution-migration-précipitation des différentes espèces, en fonction de la composition initiale du ciment, du rapport E/C et de la cinétique d'hydratation ajustée à partir d'essais calorimétriques. Le suivi au cours du temps des différentes espèces présentes dans le volume est réalisé comme illustré Figure 3(b) et des

résultats annexes comme la quantification de la porosité sont obtenus grâce au développement d'algorithmes de post-traitement. A chaque échéance de cicatrisation, un sous-volume représentatif est extrait pour réaliser des essais mécaniques de traction dans le domaine élastique sous le code Cast3M afin d'obtenir le comportement mécanique d'une éprouvette cicatrisée connaissant les propriétés intrinsèques des phases.

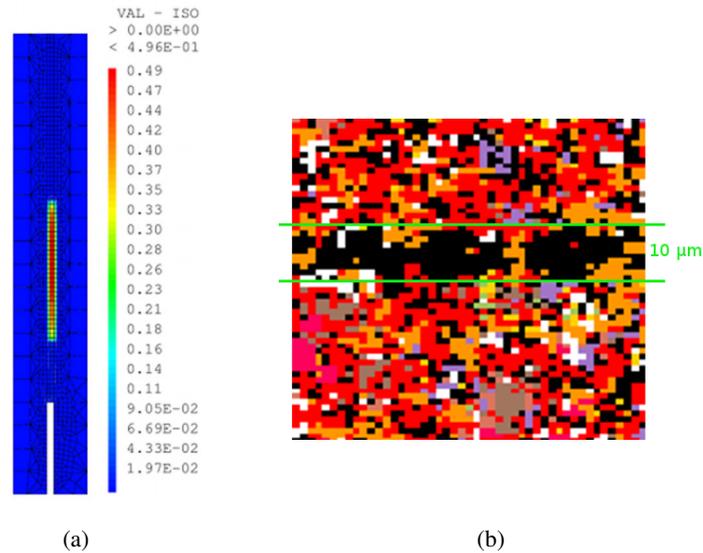


Figure 3. Exemple d'une carte d'endommagement obtenue après cicatrisation grâce au modèle mésoscopique (a), et coupe 2D du modèle microscopique d'une fissure de largeur initiale 10 µm après 5 jours de cicatrisation (noir : vide rempli d'eau ; marron, gris et bleu pastel : anhydres ; rouge et rose : CSH faible et haute densité ; orange : portlandite) (b)

3.3. Modèle mésoscopique de transport réactif

Un modèle de transport réactif basé sur la thermodynamique a été développé dans le code TOUGHREACT pour étudier la formation de précipités dans ou à proximité de la fissure par réaction des ions bicarbonates de l'eau et du calcium issu de la matrice cimentaire (soit de l'eau interstitielle, soit du fait de la dissolution de la portlandite). Un échantillon numérique d'une longueur de 5 mm en contact avec de l'eau sur un côté est maillé par des cellules de 100 µm (ou 50 µm en peau du béton). Les premières couches d'eau, initialement à pH = 7, sont discrétisées par des cellules de largeur 100 µm afin d'obtenir des informations sur les espèces chimiques présentes, et éventuellement les précipités tels que la calcite. Les constantes d'équilibre de réaction de dissolution / précipitation sont issues de la base thermodynamique THERMODDEM. Le couplage entre le transport et les réactions chimiques est résolu grâce à des équations de bilan massique pour les différentes espèces primaires ainsi que les équations d'électroneutralité. La fin du phénomène d'auto-cicatrisation est généralement attribuée à la difficulté des ions à diffuser à travers les premières couches de calcite formées sur les lèvres de la fissure [EDV 99]. C'est pourquoi, nous avons étudié l'influence des changements de porosité sur la diffusivité effective D à partir de la diffusivité initiale D_0 reliées par la tortuosité τ et la porosité ϕ (équation 2).

$$D = \tau \times \phi \times D_0 \quad (2)$$

4. Analyse des résultats

4.1. Conditions de développement et cinétique de la cicatrisation

4.1.1. Observation microscopique

Pour les éprouvettes fissurées à 18 jours et ayant 90 µm de largeur de fissure, on remarque que les précipités comblent rapidement la fissure jusqu'à un état quasi-stationnaire après une centaine d'heures (avec une probable

évolution plus lente ensuite). Une largeur de fissure plus grande peut être cicatrisée dans le même temps lorsque les éprouvettes sont plongées dans l'eau chargée en CO₂ (voir Figure 4(a)). Plus généralement, les fissures créées au jeune âge et sur des éprouvettes saturées sont celles qui cicatrisent le mieux et le plus rapidement.

4.1.2. Résultats du modèle de transport réactif

Le modèle numérique développé conduit à la formation de calcite dans l'eau en contact avec le mortier et dans les premiers millimètres du mortier au contact de la fissure, en remplacement de la portlandite. Même si le modèle ne permet pas de reproduire la germination des cristaux de calcite et leur localisation précise, la fraction volumique de calcite créée dans les couches d'eau permet de calculer une épaisseur équivalente de calcite formée dans la fissure. La cinétique du modèle, principalement dictée par la diffusion des ions calcium dans le mortier, conduit à une précipitation importante durant les premiers jours (voir Figure 4(a)). La prise en compte de l'influence de la porosité sur l'écoulement conduit à la localisation plus importante de la calcite formée près de la surface, puis, lorsque la porosité s'annule localement, à un arrêt de la précipitation de calcite dans la fissure (voir Figure 4(b)). De plus, le potentiel de cicatrisation, c'est à dire la quantité de calcite maximale formée, est plus importante lorsque l'échantillon est plongé dans de l'eau plus riche en ions bicarbonates, ce qui a été observé expérimentalement.

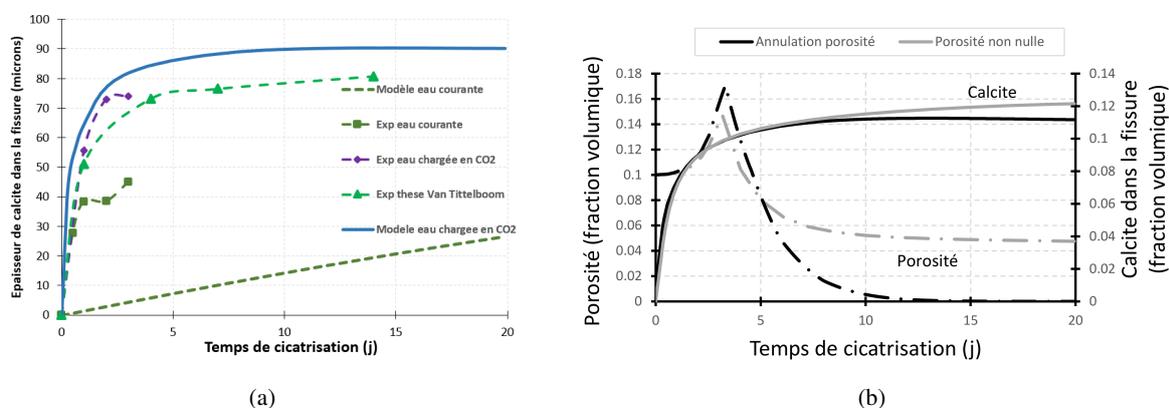


Figure 4. Cinétique de cicatrisation des éprouvettes étudiées d'une largeur initiale de 90 µm et résultat du modèle développé, avec comparaison avec des références bibliographiques (a), et influence numérique de la prise en compte de l'évolution de la porosité sur la fin du phénomène (b)

4.1.3. Caractérisation non-destructive

La technique développée permet la caractérisation globale de l'état de fissuration d'un échantillon. Lorsque l'échantillon est excité par la pastille piézoélectrique, la présence d'une fissure, jusqu'à une largeur minimale de quelques micromètres, est détectable du fait de la dépendance caractéristique qu'elle engendre entre la vitesse globale des ondes et l'amplitude d'excitation de la pompe. De plus, les mesurables acoustiques permettent de classer les différentes largeurs de fissure en accord avec leurs largeurs réelles mesurées au microscope comme illustré par la Figure 5(a). La cicatrisation totale ou partielle d'une éprouvette conduit à la diminution de la non-linéarité de l'échantillon qui se rapproche alors d'un échantillon de référence non fissuré (Figure 5(b)).

4.2. Regains mécaniques dûs à la cicatrisation

4.2.1. Principaux paramètres influents

Des regains mécaniques importants peuvent être obtenus, à la fois en terme de rigidité et de résistance pour les fissures étudiées de largeur réelle égale à 10 µm ou 20 µm (largeur choisie pour une comparaison avec les résultats de la littérature [GRA 06]). Alors que des regains de rigidité au delà de 90% peuvent être généralement observés après seulement quelques semaines d'immersion, les regains de résistance sont directement liés à l'âge de création de la fissure, et donc au degré d'hydratation (voir Figure 6(a)). Ces derniers se développent graduellement avec une évolution notable entre 2 jours et 4 semaines d'immersion.

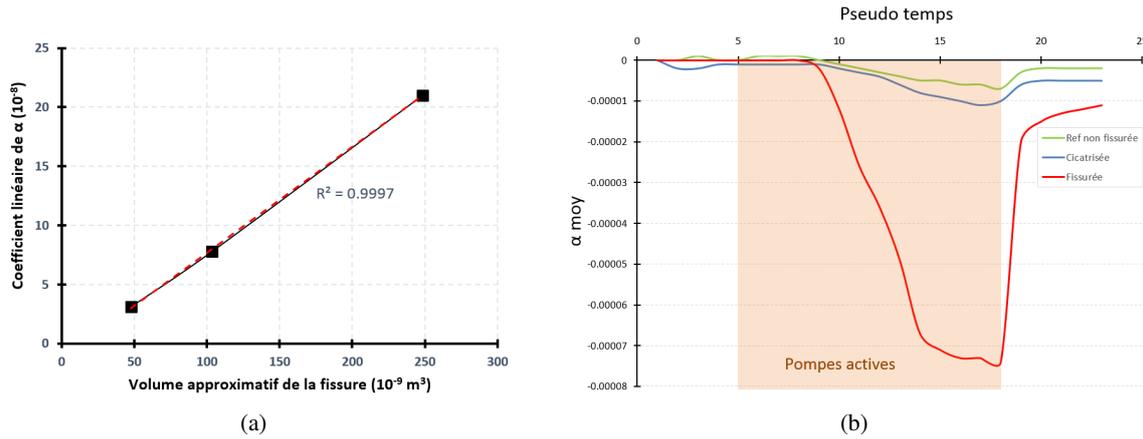


Figure 5. Proportionnalité de la variation de vitesse avec la taille de fissure (a), et détection de la cicatrisation par suivi non-destructif (b)

4.2.2. Apports du modèle mésoscopique mécanique

Le modèle mésoscopique développé livre des premières indications au sujet des propriétés des produits de cicatrisation. L'évolution temporelle des propriétés mécaniques des produits et des zones cicatrisées est responsable de l'augmentation des propriétés mécaniques observées expérimentalement. L'énergie de fissuration associée au produit de cicatrisation semble bien plus faible que celle associée aux produits issus de l'hydratation primaire. De plus, la cicatrisation des bétons étudiés par [GRA 07] aurait été partielle (avec des propriétés mécaniques meilleures près des bords), du fait du probable ralentissement du phénomène dû à la difficulté pour l'eau à traverser les premières couches de produits de cicatrisation. Enfin, le modèle montre qu'une cicatrisation partielle et localisée en bas de l'échantillon peut conduire à des performances mécaniques similaires à celles d'un échantillon sain, à condition que le produit de cicatrisation ait les mêmes propriétés mécaniques que la matrice d'origine [HIL 14a].

4.2.3. Apports du modèle micro-mécanique

Le modèle micro-mécanique développé confirme les observations expérimentales en terme de cinétique des regains mécaniques et apporte des informations nouvelles par rapport au modèle mésoscopique. Il souligne notamment l'influence de l'âge de création de la fissure. En effet, selon les résultats du modèle, une fissure plane de largeur initiale de 10 μm créée à 3 jours conduit à des regains mécaniques limités (entre 10 et 20% après 10 semaines d'immersion). Les principaux produits de cicatrisation sont la portlandite et des CSH de faible densité. Leur proportion est inversée par rapport à la matrice puisque la portlandite est majoritaire comme illustré Figure 6(b), ce qui est en accord avec des résultats expérimentaux récents [HUA 13].

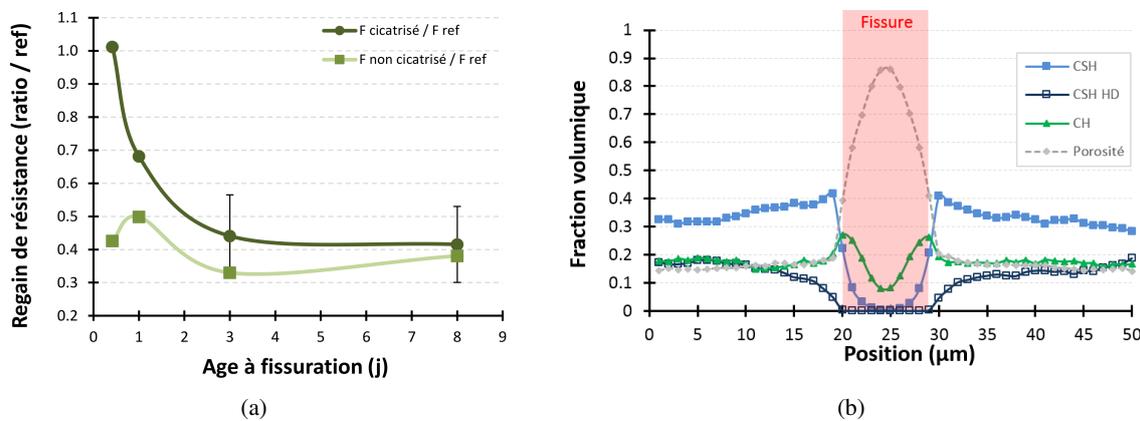


Figure 6. Influence de l'âge de fissuration sur les regains de résistance expérimentaux (a), et analyse numérique des produits de cicatrisation du modèle microscopique après 7 jours de cicatrisation (b)

5. Conclusion et perspectives

Dans cette étude, la cinétique et le potentiel de cicatrisation naturelle des matériaux cimentaires ont été étudiés. Il apparaît que l'âge de fissuration influence grandement les regains mécaniques qui peuvent être conséquents pour une fissuration avant 3 jours (fissures de retrait par exemple). La compréhension des propriétés micro-mécaniques des formulations de faible rapport E/C peut être approfondie par le développement d'un modèle basé sur un code d'hydratation. Pour une fissuration plus tardive (fissures structurelles par exemple), le comblement de la fissure par de la calcite peut être apprécié par une nouvelle technique non-destructive développée au cours de la thèse et à l'aide d'un modèle de transport réactif original.

Les résultats obtenus mènent à une meilleure compréhension des capacités naturelles des matériaux cimentaires à cicatriser. Des études à une échelle intermédiaire puis structurelle permettraient de mieux dimensionner les ouvrages sensibles à la fissuration afin d'augmenter leur sureté et leur durée de vie, notamment par l'emploi de béton fibrés à largeur de fissure limitée. Le développement de produits spécifiques et de formulations favorisant la cicatrisation apparaît aussi intéressant.

Remerciements

De sincères remerciements sont adressés à toutes les personnes dans l'entourage de la thèse ainsi qu'à la région Pays de la Loire pour son soutien financier à travers le GIS LIRGeC.

Bibliographie

- [EDV 99] EDVARSDEN C., « Water Permeability and Autogenous Healing of Cracks in Concrete », *ACI Materials Journal*, vol. 96, n° 4, p. 448-454, July-August 1999.
- [GRA 06] GRANGER S., Caractérisation expérimentale et modélisation du phénomène d'auto-cicatrisation des fissures dans les bétons, Thèse de doctorat, Ecole Centrale de Nantes, 2006.
- [GRA 07] GRANGER S., LOUKILI A., PIJAUDIER-CABOT G., CHANVILLARD G., « 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*, vol. 37, n° 4, p. 519 - 527, 2007.
- [HIL 14a] HILLOULIN B., GRONDIN F., MATALLAH M., LOUKILI A., « Modelling of autogenous healing in ultra high performance concrete », *Cement and Concrete Research*, vol. 61, p. 64 - 70, 2014.
- [HIL 14b] HILLOULIN B., ZHANG Y., ABRAHAM O., LOUKILI A., GRONDIN F., DURAND O., TOURNAT V., « Small crack detection in cementitious materials using nonlinear coda wave modulation », *NDT & E International*, vol. 68, p. 98 - 104, 2014.
- [HIL 15] HILLOULIN B., VAN TITTELBOOM K., GRUYAERT E., DE BELIE N., LOUKILI A., « Design of polymeric capsules for self-healing concrete », *Cement and Concrete Composites*, vol. 55, p. 298 - 307, 2015.
- [HUA 13] HUANG H., YE G., DAMIDOT D., « Characterization and quantification of self-healing behaviors of microcracks due to further hydration in cement paste », *Cement and Concrete Research*, vol. 52, p. 71 - 81, 2013.
- [IN 13] IN C.-W., HOLLAND R. B., KIM J.-Y., KURTIS K. E., KAHN L. F., JACOBS L. J., « Monitoring and evaluation of self-healing in concrete using diffuse ultrasound », *NDT & E International*, vol. 57, p. 36 - 44, 2013.
- [LAU 56] LAUER K., SLATE F., « Autogenous healing of cement paste », *American Concrete Institute Journal*, vol. 52, p. 1083-1097, 1956.
- [PIM 05] PIMIENIA P., CHANVILLARD G., « Durability of UHPFRC specimens kept in various aggressive environments », *Proceedings of the 10th International Conference On Durability of Building Materials and Components LYON, France, 17-20 April 2005*, 2005.
- [RAN 13] RANAIVOMANANA H., VERDIER J., SELLIER A., BOURBON X., « Sealing process induced by carbonation of localized cracks in cementitious materials », *Cement and Concrete Composites*, vol. 37, p. 37 - 46, 2013.
- [ROO 13] DE ROOIJ M., VAN TITTELBOOM K., DE BELIE N., SCHLANGEN (EDS) E., *Self-Healing Phenomena in Cement-Based Materials*, Springer Netherlands, 2013.
- [SNI 02] SNIEDER R., GRET A., DOUMA H., SCALES J., « Coda wave interferometry for estimating nonlinear behavior in seismic velocity », *Science*, vol. 295, p. 2253-2255, 2002.
- [ZHA 12] ZHANG Y., ABRAHAM O., GRONDIN F., LOUKILI A., TOURNAT V., DUFF A. L., LASCOP B., DURAND O., « Study of stress-induced velocity variation in concrete under direct tensile force and monitoring of the damage level by using thermally-compensated Coda Wave Interferometry », *Ultrasonics*, vol. 52, n° 8, p. 1038 - 1045, 2012.