

21^e édition des Journées scientifiques
du Regroupement francophone pour la recherche et la formation sur le béton
(RF)²B

Polytechnique Montréal, Montréal, Canada
5 et 6 juillet 2023

DISPOSITIF À L'ÉCHELLE PILOTE PERMETTANT L'ÉVALUATION QUANTITATIVE D'UNE BIOCATRISATION DE DALLE EN BÉTON FISSURÉE

A. Perrin^{A,B,C}, R. Gagné^A, C. Lors^{B,C}

A : Département de génie civil et de génie du bâtiment, Université de Sherbrooke, Québec, Canada.

B : IMT Nord Europe, Institut Mines-Télécom, Univ. Lille, CERI Matériaux et Procédés, F-59000 Lille, France

C : Université de Lille, Institut Mines-Télécom, Univ. Artois, Junia, ULR 4515 – LGCgE, Laboratoire de Génie Civil et Géo-Environnement, F-59000 Lille, France

RÉSUMÉ : La biocatratisation permet de réparer des fissures grâce à l'activité microbienne, qui produit des cristaux de carbonate de calcium mêlés à du biofilm généré par les micro-organismes. L'objectif de ce travail est la mise au point d'un dispositif d'évaluation quantitative d'une réparation de fissures moyennes dans une dalle en béton. La production et la fissuration de cette dalle de 2 m² a permis de créer deux fissures d'environ 400 µm. Le colmatage de ces fissures est suivi grâce à une mesure de l'évolution du débit d'eau traversant les fissures. Après un traitement biologique de 11 semaines réalisé par injection et badigeonnage, les deux fissures sont colmatées à 99 %. Le colmatage était de 95 % au bout de 28 jours et une injection. Des observations microscopiques (MEB-EDS) ont confirmé que le matériau de colmatage généré est un composite formé de carbonate de calcium et d'éléments biologiques.

1. INTRODUCTION

Le béton se dégrade en contact avec l'environnement. Une des causes et des conséquences de ces dégradations est la fissuration. Elle permet l'entrée d'agents agressifs qui peuvent amplifier les dégradations. Il est nécessaire de colmater ces fissures pour augmenter la durabilité des ouvrages. Il existe différentes techniques de réparation conventionnelles par injection qui utilisent majoritairement, comme matériau de réparation, des résines pour les fissures fines et des matériaux cimentaires pour les fissures larges. Une autre approche est la biocatratisation, une technique de réparation biologique des fissures dans le béton. Les fissures sont colmatées avec de la calcite ou de la vatérite, des cristaux de carbonate de calcium biosourcés (Durand et al., 2018). La biominéralisation du carbonate de calcium (CaCO₃) se fait avec différents mécanismes métaboliques de microorganismes (Perito, 2014). Une voie métabolique intéressante est la conversion de matière organique (Mondal, 2019). Cette voie se base sur la respiration ou la fermentation d'un composé organique pour produire et relâcher du dioxyde de carbone (CO₂) autour de la cellule bactérienne. Dans les conditions de pH basique du béton, ce CO₂ réagit avec l'eau pour former du carbonate (Wilson et al., 2001). En présence de calcium, ces deux molécules réagissent pour former du CaCO₃ qui peut cristalliser sous la forme de calcite ou de vatérite. Le lactate de calcium est un composé organique très utilisé pour la biocatratisation (Ducasse Lapeyruss, 2014; Lors et al., 2017; Wiktor and Jonkers, 2011). Il s'agit d'une source de carbone et de calcium accessible et peu cher. Deux stratégies de réparation différentes sont utilisées : l'autobiocatratisation et l'exobiocatratisation.

L'autobiocicatrisation permet de prévenir l'apparition des fissures. Les bactéries et les nutriments sont incorporés directement dans le béton, ou encapsulés lors de la coulée. La réparation se fera spontanément après fissuration. L'objectif de cette technique est d'utiliser les bactéries pour produire un matériau autoréparant. Toutefois, cette méthode présente des limites liées au fait qu'un béton sain est alcalin et que dans cet environnement les cellules bactériennes survivent peu.

L'exobiocicatrisation est une méthode curative, qui permet de réparer les fissures existantes et qui nécessite une intervention extérieure pour leur réparation. Les bactéries et les nutriments sont apportés à la surface ou dans la fissure à réparer. Cette approche est moins chère, car les composés de réparation sont utilisés en petite quantité là où ils sont nécessaires. En laboratoire, les éprouvettes de mortier fissurées (Ducasse-Lapeyrousse, 2014) sont immergées dans le milieu inoculé. Cette technique permet une évaluation quantitative de la réduction de l'ouverture apparente de fissures mesurée par des mesures de perméabilité à l'air. Cependant, la technique d'immersion est généralement peu adaptée à la réparation d'ouvrages. D'autres techniques plus applicables *in situ* peuvent être utilisées, comme l'aspersion et l'injection. Ces techniques ont été expérimentées sur des murs intérieurs de la maquette VERCORs, qui est une réplique à l'échelle 1/3 d'une enceinte de réacteur nucléaire et sur les digues d'un barrage hydro-électrique (Perrin, 2022). L'injection d'une formulation épaissie peut effectivement être utilisée pour apporter les bactéries et les nutriments dans une fissure verticale. Des travaux précédents ont permis de mettre au point un procédé de biocicatrisation avec un mélange de micro-organismes (CBB2020) et une formulation épaissie applicable à des fissures verticales (Perrin, 2022). Ce dispositif de biocicatrisation est utilisé pour traiter une fissure de 400 µm dans un barrage hydro-électrique. L'évaluation du colmatage des fissures est qualitative avec l'observation du débit d'eau au travers de la fissure. Cependant, pour valider le procédé de biocicatrisation, il est nécessaire de le tester sur des fissures réalistes avec une évaluation quantitative du colmatage.

L'objectif de ce travail de recherche est de mettre au point un dispositif de laboratoire permettant de générer des fissures représentatives dans un élément en béton armé dans le but de permettre une évaluation quantitative du colmatage des fissures. Ce dispositif est ensuite être utilisé pour quantifier l'efficacité du dispositif de biocicatrisation utilisé.

2. PROGRAMME EXPERIMENTAL

L'objectif de la recherche est de développer et d'utiliser un dispositif de laboratoire pour quantifier l'efficacité de l'exobiocicatrisation des fissures dans une dalle de béton armé de 2 x 1 x 0,15 m (Fig. 1.1). Des fissures réalistes sont produites en appliquant une force constante sur trois barres d'armature dépassant aux deux extrémités de la dalle (Fig 1.2). Après la fissuration, l'ouverture apparente est mesurée, puis le débit d'eau la traversant est quantifié. Ce débit est mesuré avec une plaque d'injection permettant de chronométrer le temps d'infiltration d'un volume fixe d'eau traversant la fissure. Le débit d'eau initial est mesuré avant le traitement d'exobiocicatrisation (Fig 1.3). Le traitement biologique est réalisé en injectant un milieu biocicatrisant contenant des bactéries via des ports d'injection collés sur la surface du béton (Fig 1.4). Les orifices d'injection sont ensuite retirés et le dispositif de mesure du débit d'eau est utilisé périodiquement pour évaluer l'évolution du processus d'étanchéité sur une période de 11 semaines (Fig 1.5). À la fin du traitement, des carottes sont prélevées pour l'analyse des produits formés dans le volume de la fissure interne par microscope électronique à balayage (MEB) et spectroscopie à dispersion d'énergie (SDE) (Fig. 1.6 et 1.7).

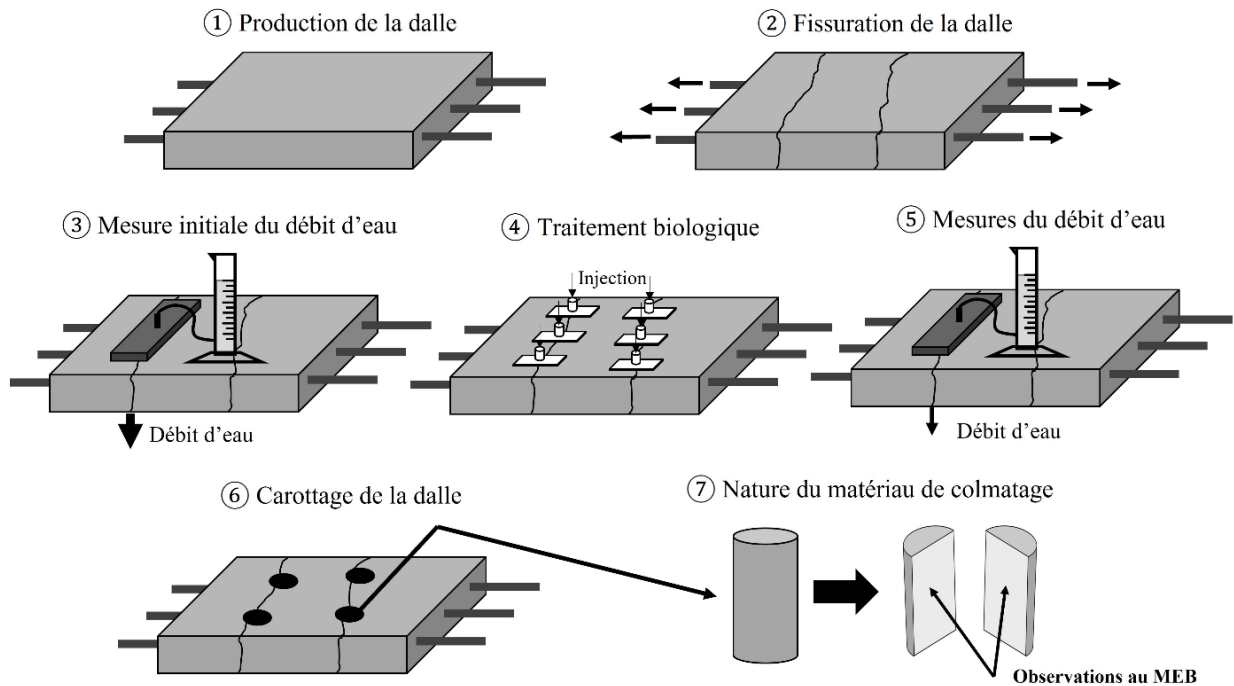


Figure 1 : Programme expérimental.

3. MATERIEL ET METHODES

3.1 Dalle

3.1.1 Production de la dalle

La dalle (1 x 2 x 0,15 m) est produite avec un béton commercial (E/C = 0,7) de 25 MPa (Fig. 2). Elle est traversée par trois barres d'armatures de 35 mm filetées à leurs extrémités. Des tubes en acier de diamètre intérieur de 38 mm, d'une épaisseur de 5 mm et d'une longueur de 300 mm sont placés sur chacune des barres d'armature pour limiter l'adhérence entre le béton et la barre au niveau de la zone à fissurer. Quatre plaques en métal de 1 mm d'épaisseur et de 5 cm de largeur ont été fixées aux deux côtés du coffrage pour créer deux plans de fragilité pour initier la formation de deux fissures. La dalle a été coulée sans vibration. Elle a été murie pendant 14 jours dans son coffrage recouvert d'un jute humide régulièrement arrosé avec de l'eau pour le maintenir continuellement humide.

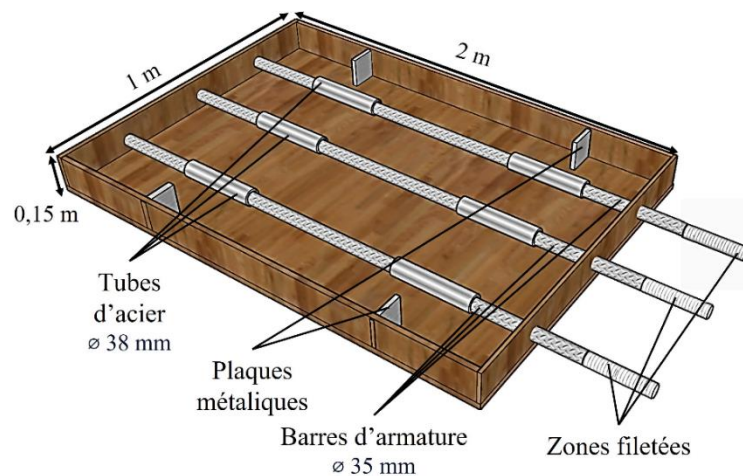
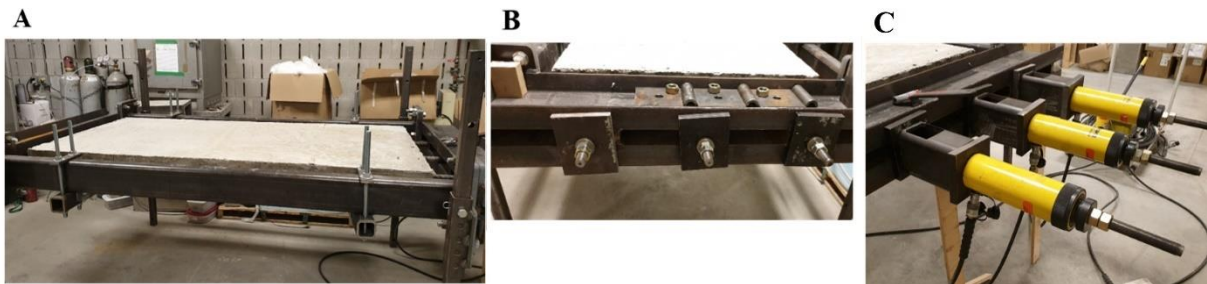


Figure 2 : Moule de la dalle.

3.1.2 Fissuration de la dalle

Après le mûrissement, la dalle est décoffrée puis placée au centre d'un cadre rigide (Fig. 3A). Les barres d'armatures sont maintenues au cadre par des plaques d'appui (Fig. 3B). De l'autre côté, les barres filetées sont raccordées à des adaptateurs connectés à un vérin hydraulique (Fig. 3D). Ces vérins tirent progressivement les barres d'armature pour induire une contrainte de traction dans le béton de la dalle et la fissurer. Un écrou à haute résistance (Fig. 3C), placé sur le filetage des barres d'armature du côté des vérins, permet de bloquer la position de la barre une fois que la taille de la fissure est satisfaisante. La dalle a été carbonatée sous une tente en plastique pendant trois mois à 80 % d'humidité relative et sous une concentration de CO₂ de 10 000 ppm (1%). Les tailles des fissures sont mesurées à l'aide du vidéomicroscope. Neuf points de mesures sont faits tous les 10 cm le long des deux fissures sur leurs faces supérieures et inférieures. La moyenne de ces mesures donne pour les deux fissures 1 et 2 une taille similaire. Les ouvertures supérieure et inférieure de la fissure 1 sont respectivement de 416 µm et 447 µm, celles de la fissure 2 sont respectivement de 432 µm et 430 µm.



A : dalle sur cadre. B : écrous de haute résistance. C : vérins hydrauliques.

Figure 3 : Dalle montée sur cadre.

3.1.3 Mesure du débit d'eau

La cinétique du colmatage des fissures est quantifiée en mesurant le débit d'eau à travers une longueur donnée d'une fissure à l'aide d'un dispositif d'injection d'eau (Fig. 4). Le dispositif d'injection est une boîte en aluminium de 40 x 14 x 3 cm (plaque d'injection) placée à l'envers sur la surface du béton et au-dessus de la trajectoire de la fissure. La plaque d'injection est équipée d'une valve pour l'injection d'eau et d'une valve à bouton-poussoir pour évacuer l'air à l'intérieur de la boîte avant le début de la mesure. Un joint en néoprène est placé entre la plaque d'injection et la surface du béton. L'alimentation en eau est assurée par un cylindre gradué de 1 litre relié à la plaque d'injection par un tube flexible. En régime permanent, le débit d'eau est obtenu à partir du temps nécessaire pour abaisser le niveau d'eau dans une fourchette spécifiée. La plaque d'injection est fermement appuyée contre la face de la dalle à l'aide d'un cadre amovible. Il se compose de deux pinces en acier sur les côtés de la dalle qui maintiennent deux tiges transversales. Chaque tige est munie de deux vis de serrage pour presser fermement la plaque d'injection contre la surface du béton.

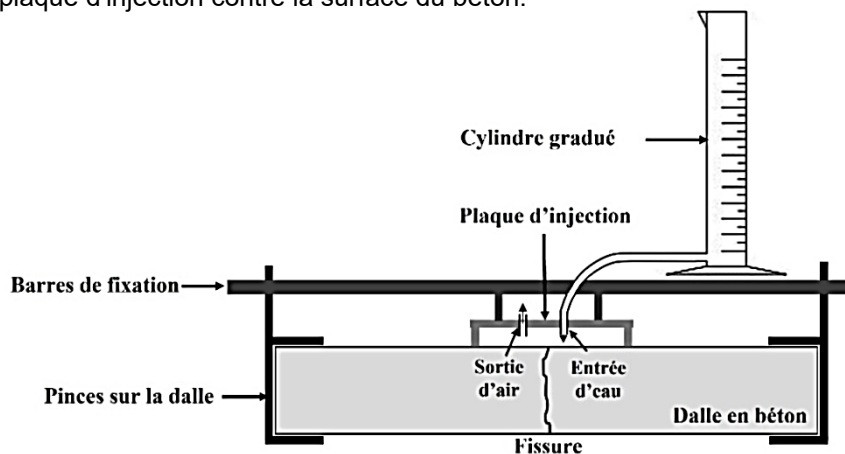


Figure 4 : Dispositif de mesure du débit d'eau.

La procédure de mesure du débit d'eau débute par le remplissage de la plaque d'injection avec l'eau du cylindre gradué. Les vannes d'entrée d'eau et de sortie d'air sont ouvertes jusqu'à ce que de l'eau sorte de la vanne de sortie d'air, ce qui indique le remplissage complet de la plaque d'injection. Les deux vannes sont alors fermées. L'éprouvette graduée est remplie d'eau jusqu'au repère de 500 ml et la soupape d'admission d'eau est ouverte. Lorsque l'éprouvette est vide, la valve est fermée et l'éprouvette est remplie à nouveau avec 500 ml d'eau. Cette opération est répétée 5 fois pour obtenir un régime permanent d'infiltration. Le 5^e passage de l'eau est chronométré, ce qui permet de calculer le débit d'eau à travers la fissure. Le débit d'eau unitaire (W_L , pour une fissure de 1 m de longueur) est la valeur utilisée pour quantifier l'étanchéité de la fissure.

$$W_L = \frac{W_f}{l} \quad (\text{eq. 1})$$

W_L : débit d'eau unitaire ($\text{ml.s}^{-1} \text{m}^{-1}$).

W_f : débit d'eau (ml.s^{-1}).

l : longueur de fissure sous la plaque d'injection (0,37 m).

3.2 Traitement biologique des fissures

3.2.1 Milieux d'injection

Le traitement biologique fait intervenir deux milieux d'injection de consistance liquide (viscosité faible) et de consistance épaissie (viscosité élevée). Ces milieux d'injection sont composés de lactate de calcium penta-hydraté (Sigma Aldrich, $M = 308,29 \text{ g.mol}^{-1}$), de gluconate de calcium monohydraté (Sigma Aldrich, $M = 448,39 \text{ g.mol}^{-1}$), d'extrait de levure (Biokar®); de poudre de carbonate de calcium (Betocarb® F, particules de $1,4 \mu\text{m}$ en moyenne), et de poudre d'Attigel 50® (BASF, particules de $9 \mu\text{m}$ en moyenne). L'Attigel 50® est composé d'attapulgite et d'aluminosilicate de magnésium hydraté ((Mg, Al) $5\text{Si}_8\text{O}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$).

L'inoculum utilisé est un consortium de micro-organismes (CBB2020) collecté à la surface d'éléments en béton en service. Il est stocké dans du glycérol à $-80 \text{ }^\circ\text{C}$ et décrit dans (Perrin, 2022). La préculture est préparée en ajoutant 1,5 ml de cryotube de CBB2020 dans 100 ml de milieu de préculture composé de lactate de calcium à 50 g.L^{-1} et d'extrait de levure à 3 g.L^{-1} . La préculture est stockée sous agitation (150 rpm) à 20°C pendant 24 h.

Le milieu liquide de faible viscosité est le premier à être injecté dans la fissure. Il est obtenu en dissolvant 25 g de lactate de calcium et 1,5 g d'extrait de levure dans 500 ml d'eau distillée puis stérilisé par filtration à $0,2 \mu\text{m}$. Le milieu est inoculé avec 1 ml de préculture et est stocké sous agitation (150 rpm) à 20°C pendant 24 h.

Le milieu d'injection épaissi est destiné à être injecté après le milieu d'injection liquide. Les composants ont été stérilisés à l'autoclave pendant 20 minutes à 120°C . La stérilisation à sec est utilisée pour l'Attigel 50 (37,2 g), le carbonate de calcium (10,4 g) et le gluconate de calcium (5,2 g). Le lactate de calcium (57,2 g), l'extrait de levure (1,6 g) et 400 ml d'eau distillée ont été stérilisés séparément. Tous les composants ont été mélangés pendant deux minutes à 22 000 tours/minute dans un mélangeur Waring stérile, puis 5 ml de préculture ont été ajoutés. Le milieu de cicatrisation biologique inoculé est ensuite mélangé pendant 10 secondes à 18 000 tours/minute.

3.2.2 Réalisation du traitement

Après la première mesure de débit d'eau à travers les fissures (mesures W_{L0}), une feuille d'aluminium autocollante est utilisée pour sceller la fissure sur les faces latérales et inférieures de la dalle en béton. Sur la face supérieure, des têtes d'injection sont installées et collées avec de la résine époxy. Des bandes adhésives, placées transversalement aux fissures, sont utilisées pour empêcher la résine de pénétrer dans les fissures lorsque les têtes d'injection sont collées. Une fois la résine polymérisée, le reste de la fissure est fermé à l'aide d'une feuille d'aluminium et d'un mastic de silicone. L'injection est réalisée séquentiellement à l'aide d'une seringue, d'une tête à l'autre, pour remplir les fissures. Après une semaine, les bandes adhésives et les têtes d'injection sont retirées de la zone centrale pour permettre l'installation de la plaque d'injection. La mesure du débit d'eau est effectuée. Après la mesure

du débit, les surfaces supérieures des deux fissures sont à nouveau préparées pour l'injection. Les têtes d'injection ne sont pas placées au même endroit que lors de la première injection.

Les deux fissures subissent les mêmes traitements biologiques : deux injections suivies d'un traitement de surface avec le milieu épaissi. Dans le cas de la fissure 2, des mesures de débit d'eau sont effectuées régulièrement (toutes les semaines). Dans le cas de la fissure 1, une seule mesure de débit est effectuée au dernier moment, juste avant l'injection suivante. La séquence détaillée des biotraitements et des mesures de débit d'eau est présentée dans la figure 5.

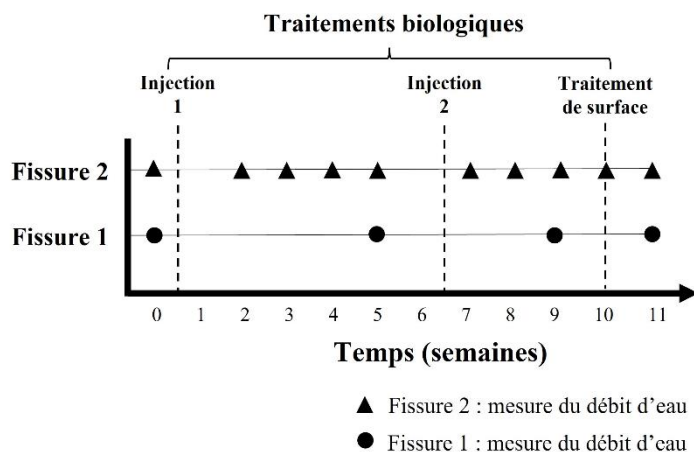


Figure 5 : Séquence de traitement des fissures.

3.3 Observation du matériau de colmatage

Il est nécessaire de déterminer la nature du matériau de colmatage dans les fissures, pour déterminer si les variations de débit observées découlent d'une activité biologique. Après les mesures finales du débit d'eau, deux carottes (A et B) ont été prélevées dans chaque fissure (1 et 2). Les carottes ont un diamètre de 5 cm et une longueur de 30 cm. Les quatre carottes sont identifiées par : 1A, 1B, 2A et 2B. Immédiatement après le forage, les deux moitiés sont séparées le long du plan de la fissure (Figure 1.6 et 1.7). Des échantillons sont découpés à sec à l'aide d'une scie à céramique pour produire des éprouvettes d'environ 1 cm³. Immédiatement après la découpe, les éprouvettes sont placées dans un dessiccateur pour d'éviter la formation d'une couche de carbonatation à la surface du béton. Les éprouvettes ont été métallisées avec une couche mixte or-palladium pour être observés au microscope électronique à balayage (Hitachi S-3000N et Hitachi S-4700).

4 RESULTATS

4.1 Évaluation quantitative du colmatage des fissures

Pour la fissure 1, le débit d'eau unitaire (W_L) diminue de 14,6 à 0,2 ml.s⁻¹.m⁻¹. Chaque traitement entraîne une réduction du débit d'eau (Fig. 6). La réduction la plus importante est observée après la première injection, soit 94 % de réduction du débit initial. Les deux traitements suivants entraînent une réduction supplémentaire de 4 % et de 1 % pour la deuxième injection et le traitement de surface, respectivement. Ces résultats démontrent que chaque biotraitement améliore l'étanchéité, mais que la majorité de l'étanchéité se produit après la première injection. Après les trois biotraitements, la fissure 1 est colmatée à 99%. Pour la fissure 2, W_L passe de 16,9 à 0,2 ml.s⁻¹.m⁻¹. La réduction du débit suit la même tendance avec une réduction maximale après la première injection (85 %) puis 9,3 et 4,3 %, respectivement pour la deuxième injection et le traitement de surface. Après trois traitements, la fissure 2 est colmatée à 99%.

On observe une légère différence entre les cinétiques de colmatage des deux fissures. Après la première injection dans la fissure 2, chaque mesure du débit d'eau induit une petite augmentation du

débit. Le même phénomène est observé après la deuxième injection. Ces résultats suggèrent que la mesure du débit d'eau a un impact négatif sur le colmatage, probablement dû à la lixiviation du lactate de calcium soluble non consommé.

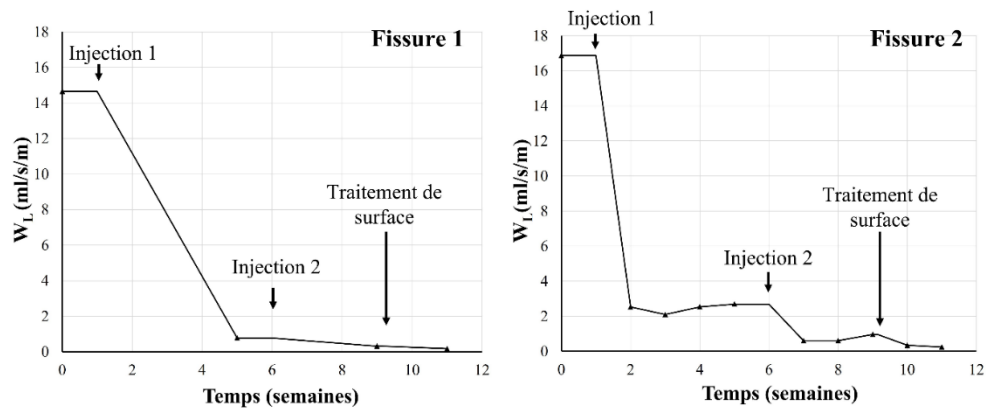


Figure 6 : Evolution du débit d'eau traversant les fissures.

4.2 Évaluation de la nature du matériau de colmatage des fissures

4.2.1 Observation au MEB

La figure 7A montre des filaments formant un réseau à la surface des produits de colmatage. Ce réseau n'est pas toujours aussi grand sur tous les échantillons observés, mais les filaments sont visibles partout à fort grossissement. L'aspect des filaments de ce réseau confirme qu'il s'agit d'éléments biologiques. Le réseau est similaire à un réseau d'hyphes montré dans (Zhang et al., 2021). Ils semblent avoir été déformés par la déshydratation, mais on peut reconnaître des hyphes fongiques. Cette morphologie d'hyphes aplatis a été observée dans une étude sur la colonisation fongique du béton (Zhao et al., 2022). La figure 7B vient appuyer cette hypothèse, une cavité dans la surface interne de la fissure, probablement une bulle d'air, a fourni l'espace nécessaire à la moisissure présente pour produire des spores. Ces structures, des spores présentes à l'extrémité d'un élément tubulaire, sont représentatives des moisissures. Il y a bien des éléments biologiques fongiques présents dans le matériau de réparation.

Les figures 7C et 7D montrent deux types de structures distinctes. Le premier type est formé d'éléments globulaires d'une taille de 1 à 3 μm associés les uns aux autres. Ces formes ressemblent à des sphères molles déformées par la déshydratation. D'après leur taille, leur forme et leur disposition spatiale les uns par rapport aux autres, ces éléments semblent être des bactéries ayant une morphologie en forme de coques ou d'endospores bactériennes de type bacille. Les observations de spores d'*Alicyclobacillus acidoterrestris*, une bactérie à morphologie de bacille, montrent des structures similaires de taille similaire (Rozali et al., 2017). Le deuxième type de structure est formé des fibres fines, entre 0,05 et 0,09 μm d'épaisseur, agglomérées autour de l'autre structure observée. La taille de ces fibres est trop petite pour qu'il s'agisse d'un hyphe ou d'un micro-organisme. Leur forme et leur disposition indiquent qu'il s'agit de structures fibreuses extracellulaires, de taille subcellulaire. La présence de ces deux éléments au même endroit et leur interaction renforcent l'interprétation de la nature bactérienne et biofilm.

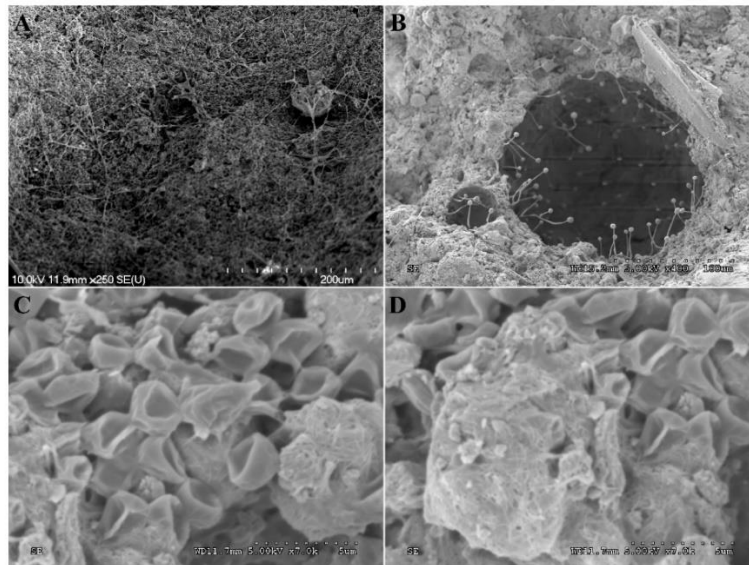


Figure 7 : Observation au MEB de l'intérieur des fissures.

4.2.2 Vérification de la composition des produits de colmatage par spectroscopie aux rayons X à dispersion d'énergie (EDS)

Les observations au MEB ont démontré la présence d'éléments biologiques dans le matériau de colmatage. Cependant, elles n'ont pas permis de déterminer si les éléments minéraux observés sont bien des cristaux de calcite. La figure 8 montre des cristaux très étroitement associés à une structure biologique. Le point 1 cible une structure identifiée précédemment comme une bactérie déshydratée. Il y en a plusieurs sur cette micrographie. Cette structure contient du carbone, de l'oxygène et de l'azote. Ce sont les trois éléments majeurs constituant la matière biologique. Cela confirme la nature bactérienne de ces structures. Le point 2 cible un cristal ayant une morphologie irrégulière et formé de carbone, d'oxygène et de calcium, les trois éléments formant du carbonate de calcium. Ceci renforce l'hypothèse de la nature biologique de ce carbonate de calcium, car l'association de ces deux éléments au même endroit est compatible avec une origine biologique.

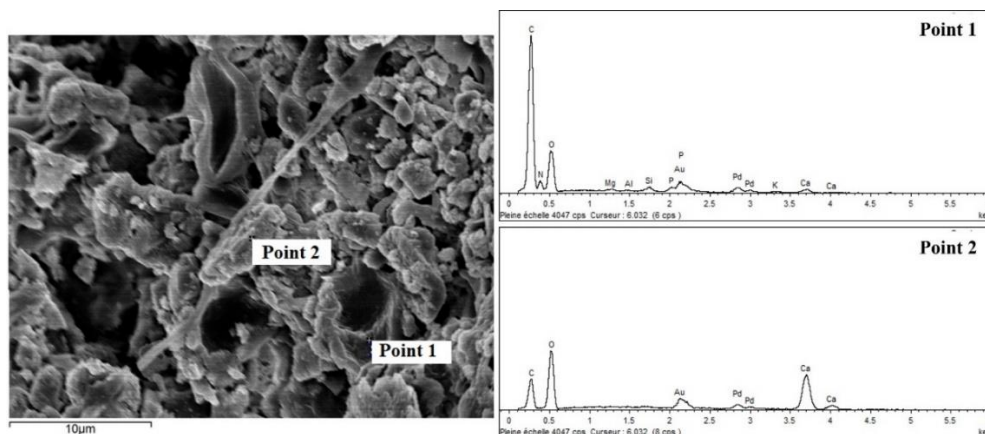


Figure 8 : EDS du carbonate de calcium et d'une structure biologique.

5. CONCLUSION

Cette recherche a permis de développer un dispositif expérimental à l'échelle pilote permettant une évaluation quantitative du colmatage biologique d'une fissure. Il s'agit d'une dalle de béton fissurée comportant deux fissures d'une taille d'environ 400 µm. Le dispositif est utilisé pour quantifier l'efficacité

du colmatage d'une fissure par biominéralisation réalisé par un consortium bactérien dans une formulation injectable épaissie. Après une injection et une semaine de traitement, le débit d'eau infiltré est réduit de 95 %. Quand la fissure est soumise quatre fois au flux de la mesure du débit d'eau, le débit d'eau infiltré n'est réduit que de 84 %. Le lessivage du matériau de colmatage est observable après une seule injection, mais n'a plus d'impact après le biotraitement complet de la fissure. Pour les deux fissures, après un traitement biologique complet (deux injections et un traitement de surface) on mesure une réduction du débit d'eau de 99 % en 11 semaines de traitement. Les observations au MEB et les analyses élémentaires EDS ont montré la nature biologique du matériau de réparation systématiquement associé à du carbonate de calcium, probablement biosourcé. Le processus de biocicatrisation permet donc de colmater une fissure de l'ordre de 400 µm d'ouverture avec un composite carbonate de calcium biosourcé.

6 REFERENCES

- Ducasse Lapeyrousse, J., (2014) Étude du potentiel d'autocicatrisation et de biocicatrisation de matériaux cimentaires fissurés. Université de Sherbrooke et Université de Lille.
- Durand, N., Monger, H.C., Canti, M.G., Verrecchia, E.P., (2018) Calcium Carbonate Features, in: Interpretation of Micromorphological Features of Soils and Regoliths. *Elsevier*, 205–258.
- Lors, C., Ducasse-Lapeyrousse, J., Gagné, R., Damidot, D., (2017) Microbiologically induced calcium carbonate precipitation to repair microcracks remaining after autogenous healing of mortars. *Constr. Build. Mater.*, 141: 461–469.
- Mondal, S., (2019) Review on microbial induced calcite precipitation mechanisms leading to bacterial selection for microbial concrete. *Constr. Build. Mater.*, 225: 67–75.
- Perito, B., (2014) A *Bacillus subtilis* cell fraction (BCF) inducing calcium carbonate precipitation: Biotechnological perspectives for monumental stone reinforcement. *J. Cult. Herit.*, 15: 345–351.
- Perrin, A., (2022) Biocicatrisation des structures en béton par injection et aspersion de milieux rhéofluidifiants inoculés. Université de Sherbrooke, IMT Nord Europe.
- Rozali, S.N.M., Milani, E.A., Deed, R.C., Silva, F.V.M., (2017) Bacteria, mould and yeast spore inactivation studies by scanning electron microscope observations. *Int. J. Food Microbiol.*, 263: 17–25.
- Wiktor, V., Jonkers, H.M., (2011) Quantification of crack-healing in novel bacteria-based self-healing concrete. *Cem. Concr. Compos.*, 33: 763–770.
- Wilson, W.W., Wade, M.M., Holman, S.C., Champlin, F.R., (2001) Status of methods for assessing bacterial cell surface charge properties based on zeta potential measurements. *J. Microbiol. Methods*, 43: 153–164.
- Zhang, X., Fan, X., Li, M., Samia, A., Yu, X., (2021) Study on the behaviors of fungi-concrete surface interactions and theoretical assessment of its potentials for durable concrete with fungal-mediated self-healing. *J. Clean. Prod.*, 292: 125870.
- Zhao, J., Dyer, T., Csetenyi, L., Jones, R., Gadd, G.M., (2022) Fungal colonization and biomineralization for bioprotection of concrete. *J. Clean. Prod.*, 330: 129793.