

# Bio-réparation des matériaux cimentaires : les bactéries au service des mortiers fissurés

V. Wiktor<sup>1</sup> et H.M. Jonkers<sup>1</sup>

Reçu le 16 juillet 2012, accepté le 2 janvier 2013

**Résumé** – L'objectif de notre étude est de développer un système de réparation pour les matériaux cimentaires qui présente de meilleures propriétés par rapport aux produits actuellement disponibles, en termes de performance à long terme et de respect de l'environnement. Ainsi, un système de réparation contenant des bactéries a été développé. Le biominéral formé via l'activité bactérienne conduit à la cicatrisation des fissures ainsi qu'à la diminution de la porosité. Le but du travail présenté ici est d'évaluer les performances du système de réparation en laboratoire et en condition réelle sur une structure à l'extérieur. Les résultats ont montré que le système développé est prometteur aussi bien en laboratoire qu'en extérieur (activité des bactéries). De plus, le remplissage des fissures en extérieur par un minéral, 4 mois après imprégnation, est un résultat très encourageant pour l'étude. Toutefois, des tests plus approfondis sont nécessaires afin de conclure sur les performances de ce système. Le taux de remplissage à l'intérieur des fissures et la nature du minéral produit doivent être déterminés afin de corréliser ou non sa présence à l'activité des bactéries présentes dans le système.

**Mots clés** : Mortier fissuré / système de réparation / système liquide / bio-cicatrisation / bactéries

**Abstract** – **Bio-repair of cementitious materials: bacteria at the service of cracked mortar.** The goal of this study is to develop a repair system for cementitious materials which features improved properties compared current available systems in terms of long term efficiency and environment friendliness. Thus, a bacteria-based repair system has been developed. The mineral formation mediated by bacterial activity results in the crack healing and the decrease of the porosity. Moreover, thanks to bacteria the repair product can be self-repaired in case of failure. The aim of the present work is to evaluate the bacteria-based system performance in laboratory condition and in real environment on a concrete structure. Results showed that the bacteria-based system is promising both in laboratory condition and outside exposition. Moreover, the presence of mineral inside the crack 4 months after impregnation operation is a promising result relating the efficiency of the system on a real structure. However, additional results are needed to conclude on the real performance of this system. The inner crack filling and the mineral identification should be assessed to relate it with the bacterial activity.

**Key words**: bacteria / bio-repair / liquid system / cracked mortar

## 1 Introduction

Bien que le béton figure parmi les matériaux de construction les plus utilisés dans le monde, l'exposition des structures aux nombreuses agressions atmosphériques et environnementales (physique, chimiques, ...) compromet la capacité du béton à conserver ses propriétés d'usage. Ainsi, afin d'anticiper les problèmes de durabilité des structures en béton, des mesures onéreuses de maintenance et de réparation sont mises en œuvre [1]. Les produits actuellement disponibles pour la protection

et la réparation des structures en béton sont en grande majorité non-respectueux de l'environnement et souffrent de problèmes de compatibilité avec le matériau original. De plus, les opérations périodiques de maintenance des structures en béton se concentrent essentiellement sur la réparation de la détérioration sans réellement considérer les problèmes de durabilité du système de réparation proprement dit [2, 3].

L'étude présentée ici tient compte de ces considérations, et a pour objectif le développement d'un système de réparation pour le béton, performant à

<sup>1</sup> Delft University of Technology, Faculty of Civil Engineering & Geosciences, Section of Materials & Environment – Microlab, Stevinweg 1, 2628 CN Delft, the Netherlands  
v.a.c.wiktor@tudelft.nl

long terme et respectueux de l'environnement grâce à l'utilisation de bactéries.

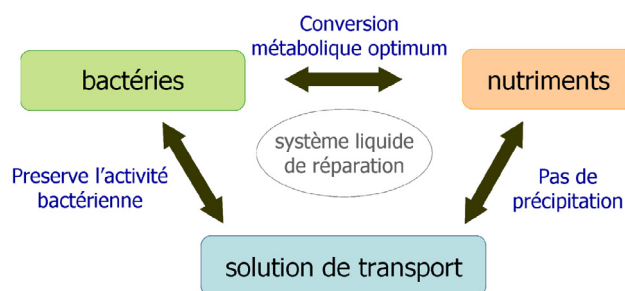
L'idée de base de ce système repose directement sur le principe utilisé pour le bio-béton auto-cicatrisant récemment développé à l'université de Delft pour lequel les fissures sont réparées par le carbonate de calcium ( $\text{CaCO}_3$ ) formé par les bactéries ajoutées au béton [4–6]. Le système de bio-réparation présenté dans cette étude est un système liquide transportant les bactéries et les nutriments (composé organique) nécessaires à l'intérieur du béton. Le biominéral formé par les bactéries conduit à la cicatrisation des fissures ainsi qu'à la diminution de la porosité. L'originalité de notre système par rapport aux nombreux travaux publiés dans la littérature [7–12] tient au fait qu'il n'utilise pas l'urée comme précurseur pour la précipitation de  $\text{CaCO}_3$  mais un sel de calcium ou de sodium, ce qui évite l'accumulation de composés azotés dans l'environnement.

Le travail présenté a un double objectif : (i) tout d'abord, l'évaluation des performances en laboratoire d'un système prometteur de réparation, (ii) puis dans un second temps l'application du système sélectionné sur une structure réelle pour comparer les performances en laboratoire et en conditions extérieures.

## 2 Matériel et méthodes

### 2.1 Le système de l'étude

Le système liquide développé dans cette étude se compose de la solution de transport, les bactéries, et les nutriments. (Fig. 1).



**Fig. 1.** Présentation du système liquide de réparation développé dans cette étude.

*Fig. 1. Schematic representation of the liquid-based repair system as developed in the present study.*

#### 2.1.1 La solution de transport

La solution de transport assure la mise en solution des bactéries et des nutriments, ainsi que leur transport au sein du béton via la porosité ou les fissures. Le pH de la solution de transport doit être alcalin pour favoriser le développement bactérien, et la précipitation prématurée des nutriments doit être évitée.

#### 2.1.2 Les bactéries

La souche bactérienne, du genre *Bacillus*, utilisée pour développer un béton auto-cicatrisant [4, 6, 13], est appliquée au système liquide de réparation. Cette bactérie alcalophile est capable former des spores. De plus, elle peut convertir métaboliquement un précurseur (nutriment) dissous en solution en carbonates dans un environnement alcalin.

#### 2.1.3 Les nutriments

Pour assurer la production de carbonates les bactéries ont besoin d'une source de carbone organique, et d'une source de calcium pour la formation de  $\text{CaCO}_3$ . Le calcium peut provenir de la matrice cimentaire, ou d'un sel de calcium qui peut être utilisé en tant que nutriment.

#### 2.1.4 Sélection d'un système prometteur

Après avoir testé diverses combinaisons bactéries-nutriment-solution de transport, Wiktor et Jonkers [14, 15] ont montré qu'un système composé de bactéries alcalophiles et de gluconate de sodium (nutriment) dans une solution de silicate de sodium (solution de transport) était le plus prometteur. En effet, un tel système permet le développement bactérien, la formation de biominéral et la densification de la microstructure de la matrice cimentaire en surface.

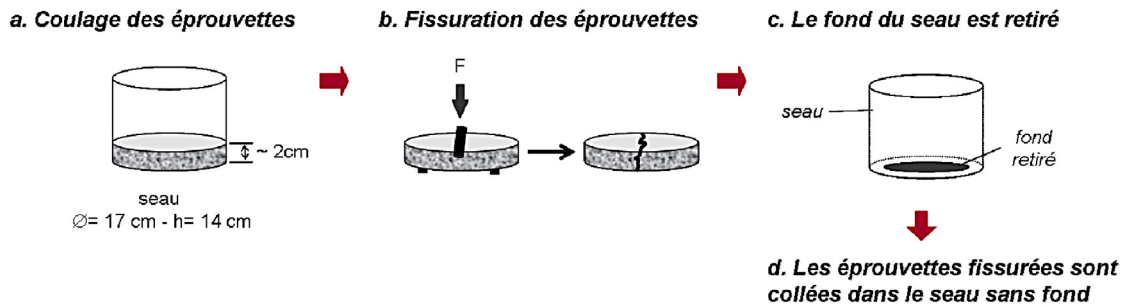
L'objectif de l'étude présentée ici est d'évaluer le potentiel de réparation de ce système en laboratoire et en condition réelle à l'extérieur.

### 2.2 Préparation des éprouvettes

Les éprouvettes de mortier sont préparées avec du ciment Portland ordinaire et du sable (0,125 mm à 4 mm de diamètre). Le rapport massique eau/ciment/sable est de 1/2/8,8. Les éprouvettes sont coulées dans des seaux en plastique de 17 cm de diamètre jusqu'à une hauteur de 2 cm (Fig. 2a). Les éprouvettes sont démoulées après 28 jours de conservation à 100 %HR et sont soumises à l'essai de flexion 3 points jusqu'à leur rupture (Fig. 2b) afin de fissurer l'éprouvette. Le fond des seaux dans lesquels les éprouvettes ont été préparées est retiré (Fig. 2c) puis les éprouvettes fissurées sont collées dans les seaux sans fond.

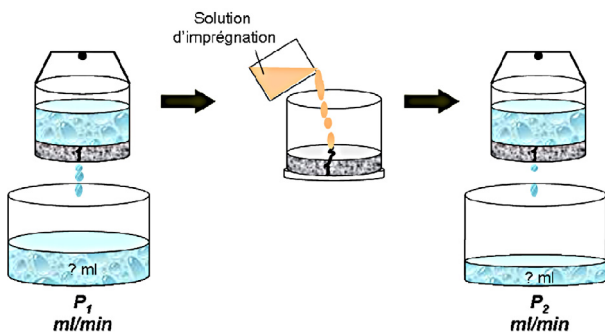
### 2.3 Test de perméabilité à l'eau

La fissuration varie d'une éprouvette à l'autre, et au sein d'une même éprouvette la largeur de fissure est également variable. C'est pourquoi les éprouvettes ne sont pas classées et comparées selon la largeur de fissure mais selon la valeur initiale de perméabilité (juste après fissuration).



**Fig. 2.** Préparation des éprouvettes.

*Fig. 2. Specimen preparation.*



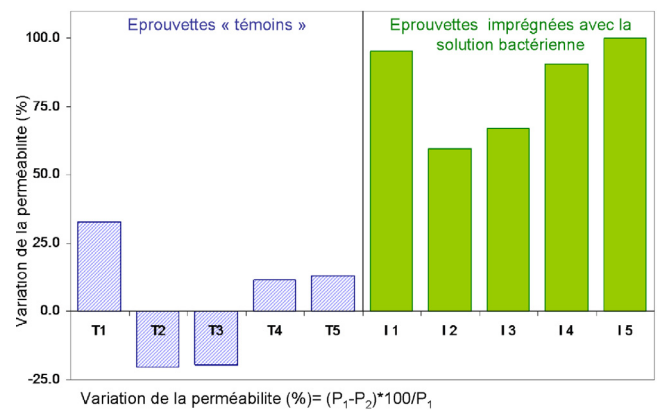
**Fig. 3.** Water permeability test used in the present study.

Le test de perméabilité se déroule comme suit (Fig. 3) : le seau contenant l'éprouvette fissurée est suspendu au-dessus d'un large récipient. Deux litres d'eau (eau du robinet) sont versés dans le seau, et le volume d'eau recueilli dans le récipient après 1 h est mesuré. Dans le cas de larges fissures pour lequel le seau se vide en moins de 1 h, le temps au bout duquel le seau est vide est enregistré. La valeur de perméabilité en ml/min est ensuite calculée. La perméabilité avant imprégnation avec le système de réparation est notée  $P_1$ , et celle après imprégnation  $P_2$ . La différence entre ces deux valeurs rend compte de la performance en laboratoire du système concernant la réparation des fissures.

## 2.4 Imprégnation des éprouvettes avec le système de réparation

Le système de réparation pour l'imprégnation des éprouvettes en laboratoire contient 125 g/l de gluconate de sodium, 175 g/l de silicate de sodium et  $4 \times 10^8$  spores/l [15]. Cinq éprouvettes sont imprégnées avec le système de réparation et cinq éprouvettes « témoin » sont imprégnées avec de l'eau du robinet. Les valeurs initiales de perméabilité sont comparables pour chaque groupe.

L'imprégnation des éprouvettes se fait 48 h après le premier test de perméabilité. Les éprouvettes fissurées sont placées sur le couvercle du seau et 100 ml de solution



**Fig. 4.** Variation de la perméabilité après imprégnation des éprouvettes.

*Fig. 4. Evolution of the permeability value after impregnation of the specimens.*

sont repartis sur la surface des éprouvettes et à l'intérieure des fissures. La présence du couvercle empêche la solution de s'échapper au travers de la fissure. Après 2 h de contact entre la solution et l'éprouvette, l'excédent de solution est retiré et les éprouvettes fissurées sont conservées 28 jours à 100 % HR à 20 °C. Un second test de perméabilité est réalisé afin d'évaluer l'efficacité du traitement.

## 3 Résultats

La figure 4 présente les résultats obtenus. Pour les éprouvettes témoins imprégnées avec de l'eau du robinet, la réparation des fissures peut être due à l'hydratation des grains de ciment non hydratés ou à la carbonatation de la matrice cimentaire. Dans les deux cas, le volume de fissure pouvant être réparé est limité, ce qui explique la faible variation de perméabilité observée (<30 %). L'augmentation de la perméabilité observée pour deux éprouvettes peut être expliquée par la perte de matériau à travers la fissure entre les deux tests de perméabilité.

En revanche, les éprouvettes de mortier ayant été en contact avec la solution bactérienne conduit à une forte réduction de la perméabilité, ce qui suggère que le taux de

réparation des fissures est élevé. Toutefois, bien qu'une diminution de la concentration en oxygène dans la solution bactérienne ait été observée (résultats non montrés), ces résultats prometteurs sont à nuancer par la présence de la concentration élevée en silicate de sodium dans la solution. En effet, la solution alcaline de silicate de sodium peut réagir avec la portlandite de la matrice cimentaire pour former un gel insoluble de silicate de calcium [16] et ainsi contribuer en partie au remplissage des fissures. La composition de la solution de réparation doit donc être optimisée avant le test sur une structure réelle.

## 4 Test en conditions réelles

### 4.1 Optimisation du système

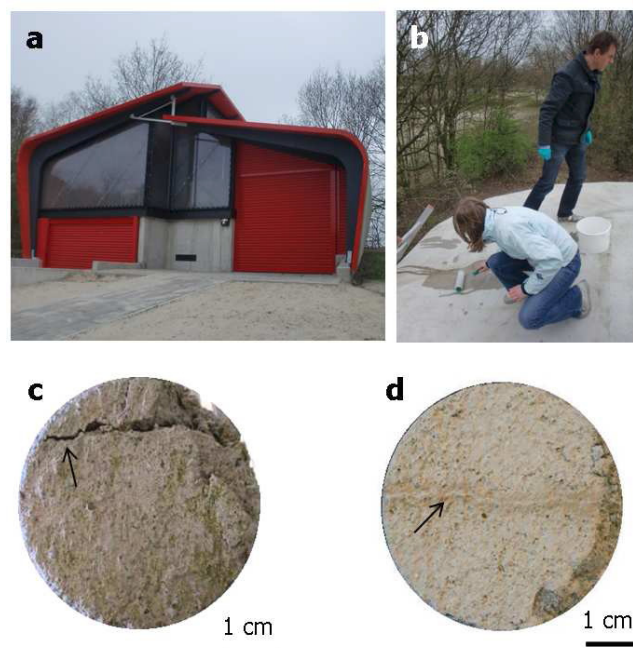
La composition du système de réparation est optimisée pour deux raisons : (i) tout d'abord, la forte concentration en silicate de sodium peut s'avérer défavorable à la formation massive de minéral par les bactéries, (ii) ensuite, pour le système testé précédemment, la source de calcium nécessaire à la formation de  $\text{CaCO}_3$  provient uniquement de la matrice cimentaire, ce qui peut, à terme, influencer négativement la microstructure.

De plus, il apparaît difficile de combiner dans une même solution une source de calcium et la solution de silicate de sodium. En effet, la formation quasi-immédiate d'un gel/précipité est observée. Nous avons donc choisi d'avoir deux solutions dans le nouveau système : la première solution composée de gluconate de sodium, spores bactériennes et silicate de sodium (faible concentration) assure les conditions optimum pour la croissance bactérienne en termes de pH et nutriment. La seconde solution qui contient une source de calcium et des spores bactériennes est appliquée directement après la première solution ce qui permet la production massive de  $\text{CaCO}_3$  via l'activité bactérienne.

### 4.2 Application du système optimisé sur une structure réelle

La structure test, située aux Pays-Bas, est présentée sur la figure 5a. Bien que récente, cette structure souffre d'un important problème de fissuration : de nombreuses fissures dont la largeur n'excède pas 1 cm sont observées sur les parois verticales et le toit. Le système de réparation est appliqué sur une partie du toit à l'aide d'un rouleau à peinture en deux étapes (Sect. 4.1) (Fig. 5b). Un échantillon des deux solutions de réparation a été prélevé après application afin de contrôler l'activité bactérienne. Les résultats ont montré que les bactéries sont actives moins de 24 h après l'application du système de réparation, attestant de la fonctionnalité du système en extérieur.

Un premier échantillon de béton est prélevé (mars 2012) au niveau d'une fissure avant imprégnation (Fig. 5c), et un deuxième sur la même zone, 4 mois après l'imprégnation (juillet 2012) (Fig. 5d). Les photos de la



**Fig. 5.** Structure pour le test en conditions réelles du système de réparation. (a) vue générale de la structure, (b) application au rouleau à peinture du système de réparation sur le toit de la structure, (c) échantillon prélevé avant imprégnation, (d) échantillon prélevé 4 mois après imprégnation.

*Fig. 5. Outdoor test application of the repair system on a concrete structure. (a) Overview of the structure, (b) brush application of the repair system on the roof, (c) concrete sampled before impregnation, (d) concrete core sampled 4 months after impregnation.*

surface (Figs. 5c, d) mettent clairement en évidence la présence d'un minéral à l'intérieur de la fissure 4 mois après imprégnation, ce qui apparaît prometteur pour notre système.

Ces échantillons sont actuellement en cours d'analyses en laboratoire afin d'évaluer le taux de réparation de la fissure (surface et en profondeur), d'identifier le minéral produit, et relier sa formation à l'activité des bactéries.

Des échantillons de mortier ont été également imprégnés en laboratoire avec ce système afin de comparer la performance de réparation des fissures du système en condition de laboratoire et en extérieur. Les résultats sont attendus courant novembre 2012.

## 5 Conclusion

L'objectif de notre étude est le développement d'un système de réparation pour les matériaux cimentaires qui présente de meilleurs résultats par rapport aux produits actuellement disponibles sur le marché, en termes de performance à long terme et respect de l'environnement. Pour cela, un système de réparation contenant des bactéries a été développé.

Le but du travail présenté ici était d'évaluer les performances du système de réparation en laboratoire et en

condition réelle sur une structure à l'extérieur. Les premiers résultats ont montré que chaque partie du système doit être sélectionnée judicieusement afin de ne pas interférer sur la capacité de production de minéral des bactéries. Les résultats ont également indiqué que le système développé est prometteur aussi bien en laboratoire qu'en extérieur (activité des bactéries). De plus, le remplissage des fissures sur une structure réelle par un minéral, 4 mois après imprégnation est un résultat très encourageant pour l'étude.

Cependant, afin d'attester de l'efficacité totale de ce système des données supplémentaires sont nécessaires. Il est primordial d'évaluer le taux remplissage à l'intérieur des fissures, et d'identifier la nature du minéral produit afin de relier ou non sa formation à l'activité des bactéries présentes dans le système.

D'autre part, la performance à long terme de ce système doit être déterminée par l'évaluation de la capacité d'auto-réparation d'une part, et d'autre part, par comparaison directe des performances de réparation avec les produits actuellement utilisés pour la réparation des matériaux cimentaires fissurés.

*Remerciements.* Les auteurs remercient Technology Foundation STW pour son soutien financier sous la forme du projet N° 11342 « Bio-based Repair and Performance Improvements of Aged Concrete Structures ».

## Références

- [1] S. Matthews, M. Sarkkinen, J. Morlidge, Achieving durable repaired concrete structures : Adopting a performance-based intervention strategy, IHS BRE Press, Bracknell, 2007
- [2] P. Robery, European standards for concrete repair, in : Concrete Repair : A practical Guide, edited by M.G. Grantham, Taylor & Francis, London and New-York, 2011, pp. 187-203
- [3] G.P. Tilly, J. Jacobs, Concrete repairs : Performance in service and current practice, IHS BRE Press, Bracknell, 44, 2007
- [4] H.M. Jonkers, Development of self-healing concrete : Towards full scale application, in : 3rd International Conference on Self-Healing Materials, Bath, UK, 2011, p. 27
- [5] V. Wiktor, H.M. Jonkers, *Cement & Concrete Composites* **33** (2010) 763-770
- [6] V. Wiktor, H.M. Jonkers, Un nouveau béton auto-cicatrisant grâce à l'incorporation de bactéries, *Matériaux et Techniques*, 2011
- [7] S.S. Bang, J.K. Galinat, V. Ramakrishnan, *Enzyme Microb. Technol.* **28** (2001) 404-409
- [8] W. De Muynck, N. De Belie, W. Verstraete, *Ecol. Eng.* **36** (2010) 118-136
- [9] J. Dick, W. De Windt, B. De Graef, H. Saveyn, P. Van der Meeren, N. De Belie, W. Verstraete, *Biodegradation* **17** (2006) 357-367
- [10] S.K. Ramachandran, V. Ramakrishnan, S.S. Bang, *ACI Mater. J.* **98** (2001) 3-9
- [11] C. Rodriguez-Navarro, M. Rodriguez-Gallego, K. Ben Chekroun, M.T. Gonzalez-Munoz, *Appl. Environ. Microbiol.* **69** (2003) 2182-2193
- [12] K. Van Tittelboom, N. De Belie, W. De Muynck, W. Verstraete, *Cement & Concrete Research* **40** (2010) 157-166
- [13] V. Wiktor, H.M. Jonkers, Development of bacteria-based systems to increase concrete structures durability, in : International Workshop on Structural Life Management of Underground Structures, Daejeon, South-Korea, 2011, pp. 51-56
- [14] V. Wiktor, H.M. Jonkers, The potential of bacteria-based repair system to increase the durability of repaired concrete structures, in : Microstructural-related durability of cementitious composites, edited by Y. Guang, K. van Breugel, W. Sun and C. Miao, Rilem Publication S.A.R.L, Amsterdam, 2012, p. 169
- [15] V. Wiktor, A. Thijssen, H.M. Jonkers, Development of a liquid bio-based repair system for aged concrete structures, in : 3rd International Conference on Concrete Repair, Rehabilitation and Retrofitting, Cape Town, South Africa, 2012, pp. 345-346
- [16] J.L. Thompson, M.R. Silsbee, P.M. Gill, B.E. Scheetz, *Cement & Concrete Research* **27** (1997) 1561-1567