

I - Introduction

La bio cicatrisation est un moyen prometteur pour la réparation des micro fissures présentes sur le génie civil et particulièrement les ouvrages en béton précontraint comme les enceintes de confinement des réacteurs nucléaires, composant essentiel des centrales nucléaires de production d'électricité.

Ce système de réparation par bio-cicatrisation consiste en la capacité des bactéries à générer du carbonate de calcium CaCO_3 , afin de colmater les micro fissures présentes. Des essais en laboratoire ont été menés pour vérifier que le colmatage des fissures par bio-cicatrisation résiste après une mise sous pression de l'ouvrage à 5bars, égale à celle appliquée sur une enceinte de confinement lors de la visite décennale d'une centrale nucléaire ainsi qu'à la présence d'autres contraintes comme la chaleur, l'humidité ou encore les rayonnements ionisants.

II - Etat des connaissances

Les matériaux de construction en béton exposés à des environnements hostiles comme les rayonnements ionisants, l'humidité, la chaleur ou encore les variations de pression peuvent subir des dégradations de leur structure et générer des microfissures. Dans le cas d'une enceinte de confinement ces micro fissures peuvent constituer un chemin pour la pénétration de radioéléments ou de gaz, qu'il convient de colmater pour maîtriser le confinement et assurer la durabilité des ouvrages. Les méthodes de traitement actuelles consistent à effectuer des injections de résine chimique dans le but de colmater ces micro fissures. L'efficacité de cette méthode au bilan environnemental médiocre est souvent difficile à mettre en œuvre et limitée dans le temps.

IV - Résultats et interprétations

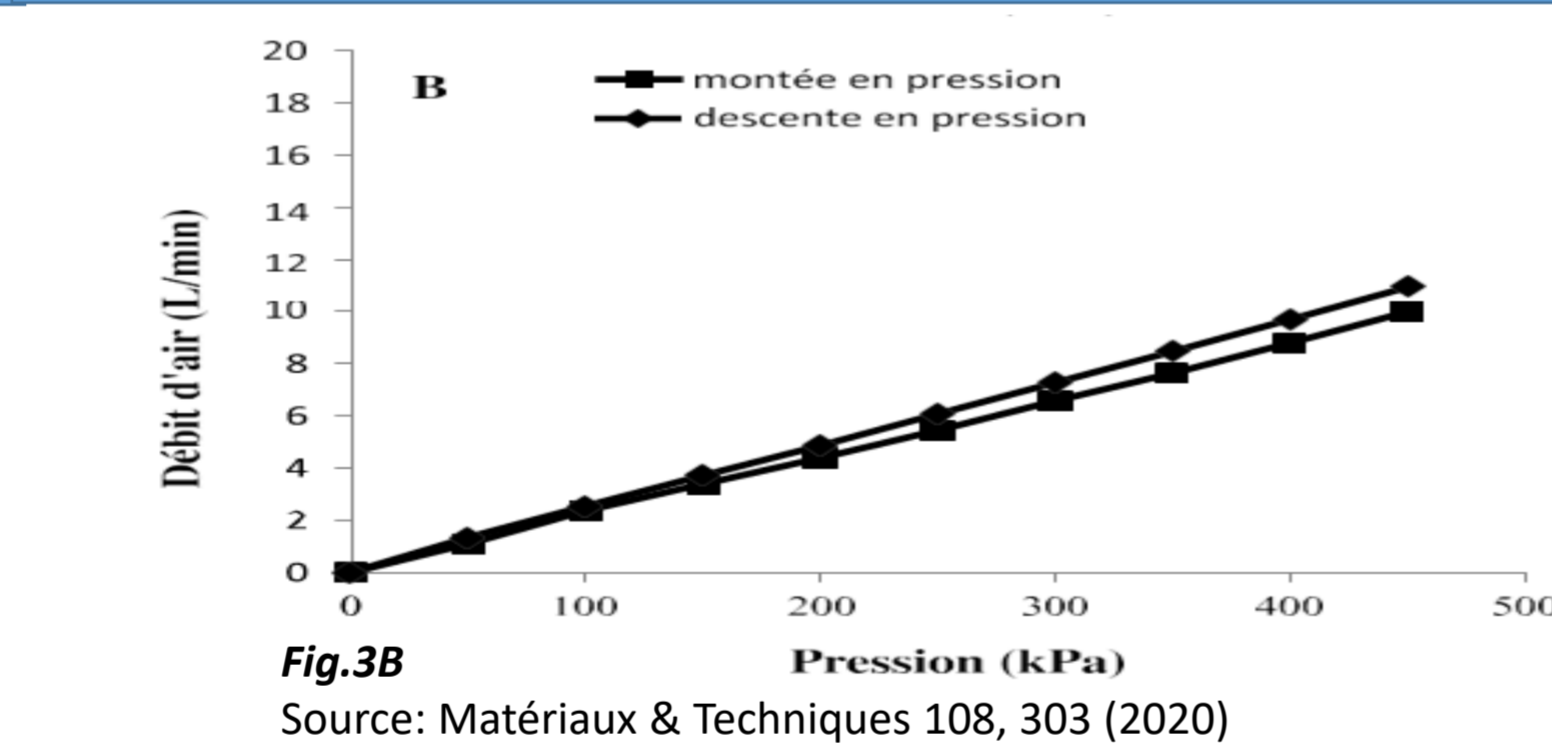
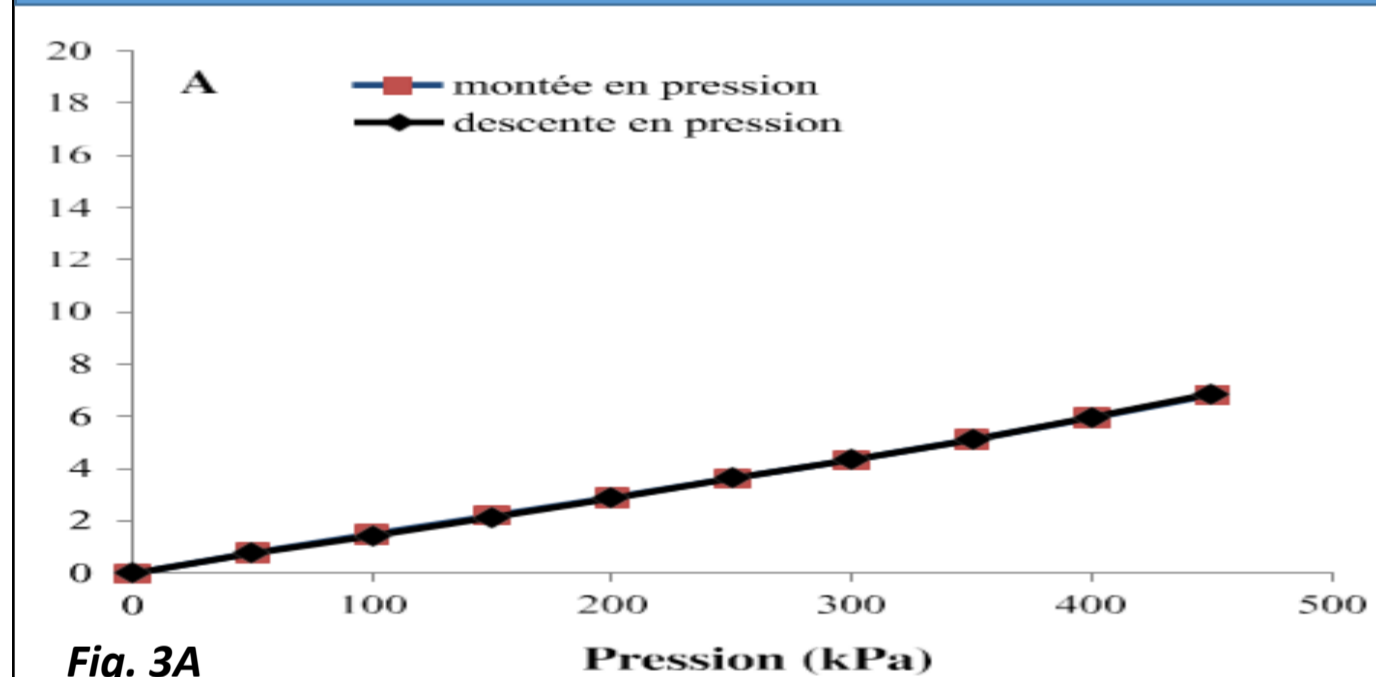
Diminution de la taille de l'ouverture apparente de la micro-fissure de 132 et 62 mm pour les mortiers A et B, entraînant une réduction de l'ouverture apparente de la micro-fissure de 86 % et 67 % (Tab.1). La taille de l'ouverture apparente de la micro-fissure après le traitement par bio-précipitation est comparable pour les deux échantillons : 22 et 30 mm.

Tableau 1: Ouvertures apparentes de la micro-fissure des mortiers A et B avant et après biocicatrisation. Diminution de l'ouverture des micro-fissures (DWt) et pourcentage de réduction de l'ouverture apparente des micro-fissures (r_w)
Source: Matériaux & Techniques 108, 303 (2020)

| Mortiers | T_o (mm) | T_{bio} (mm) | DWt (mm) | r_w (%) |
|-----------|------------|----------------|----------|-----------|
| Mortier A | 154 | 22 | 132 | 85,7 |
| Mortier B | 92 | 30 | 62 | 67,4 |

Tableau 2: Ouverture apparente (en mm) de la micro-fissure des mortiers A et B après suppression du cœur expansif (T_{sc}) et après mise sous pression (T_p).
Source: Matériaux & Techniques 108, 303 (2020)

| Mortiers | T_{sc} (mm) | T_p (mm) |
|-----------|---------------|------------|
| Mortier A | 24 | 22 |
| Mortier B | 29 | 24 |



Pression et débit d'air proportionnel sur la courbe ascendante et descendante. Courbe constante au niveau du cycle de pression, l'augmentation de la pression ne modifie pas l'ouverture de la micro fissure. Le carbonate de calcium bio précipité sur les parois de la micro fissure sont à l'origine de ce comportement.

La bio précipitation du composite carbonate de calcium à la surface du béton constitue un traitement possible pour la maintenance des ouvrages en béton

III - Matériels et méthodes

1- Préparation de mortiers fissurés :

Deux échantillons de mortiers fissurés A et B à base de ciment Portland CEM 52.5N



Illustration n°2 : Échantillons de mortiers fissurés A et B
Source: Matériaux & Techniques 108, 303 (2020)

2- Préparation de la suspension de bio précipitation :

Caractéristiques : Souche bactérienne (*Bacillus pseudofirmus*) → Aérobie et hétérotrophe
Génération de carbonate de calcium en présence d'O₂ et d'une source de calcium
Conditions : Croissance bactérienne dans des conditions aérobies à 30 °C
Après 7 jours : 30 % du lactate de calcium consommé, multiplication cellulaire par 1000.
Après 28 jours : lactate de calcium presque totalement consommé, résidu solide contenant 88 % de carbonate de calcium.

3- Bio cicatrisation des mortiers fissurés :

Inoculation de la suspension bactérienne sur deux mois (4 cycles 15j) au sein d'un milieu stérile à une température de 20°C.

4- Détermination de l'ouverture de la micro fissure bio cicatrisée:

Mesure de débit d'air dans la cellule de perméabilité. La valeur du débit d'air détermine l'ouverture apparente de la fissure.

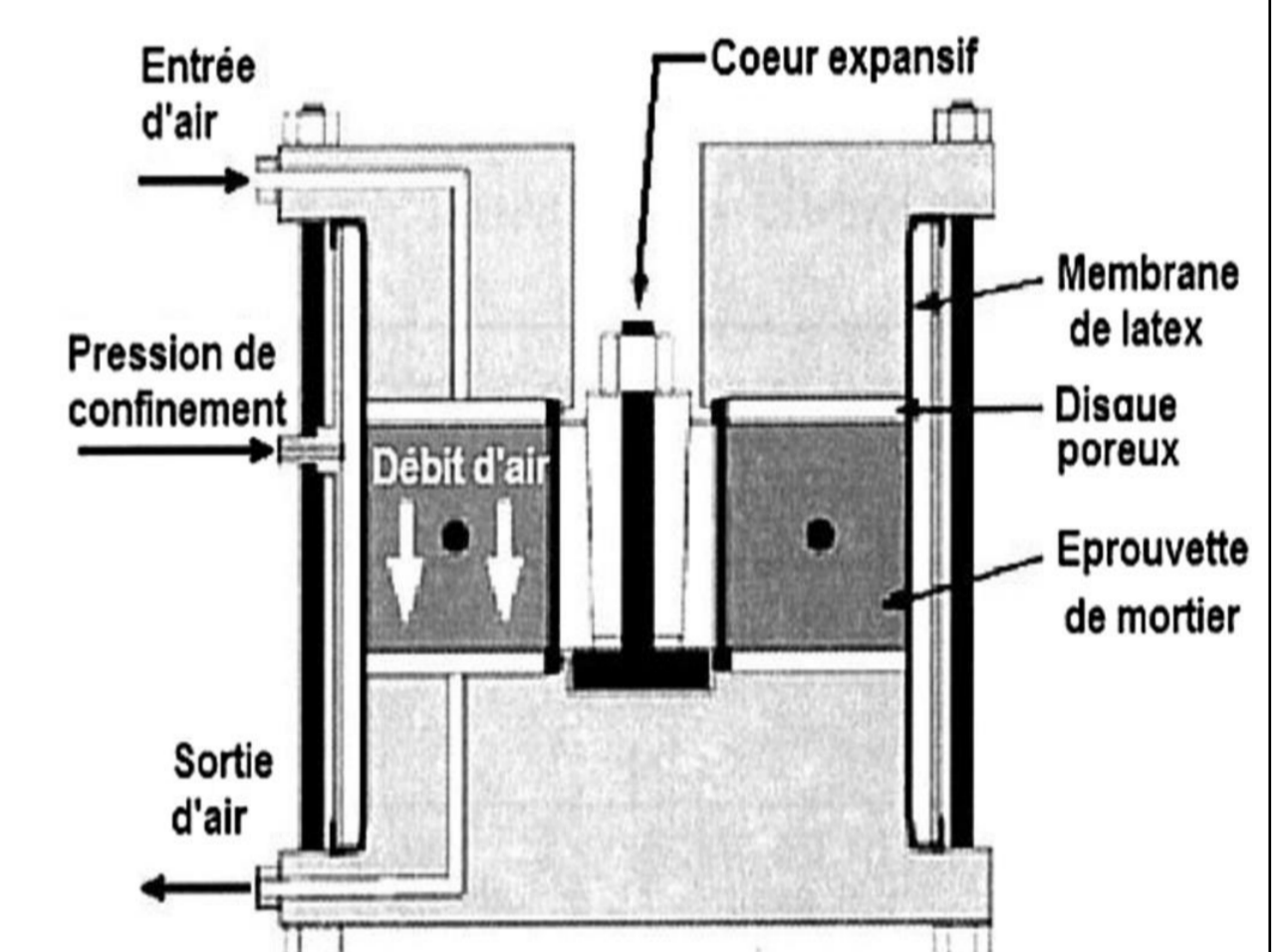


Fig.1: Dispositif de mesure du débit d'air adapté à un mortier cylindrique
Source: Matériaux & Techniques 108, 303 (2020)

5- Mise sous pression des mortiers fissurés bio cicatrisés:

Montée en pression par pas de 50 kPa jusqu'à 450 kPa, maintenue 18h puis descente pas à pas afin de simuler la mise sous pression de l'enceinte lors d'une visite décennale. Impact de la pression sur la micro fissure évalué par la différence de perméabilité à l'air avant et après la montée en pression. (Voir Fig.1)

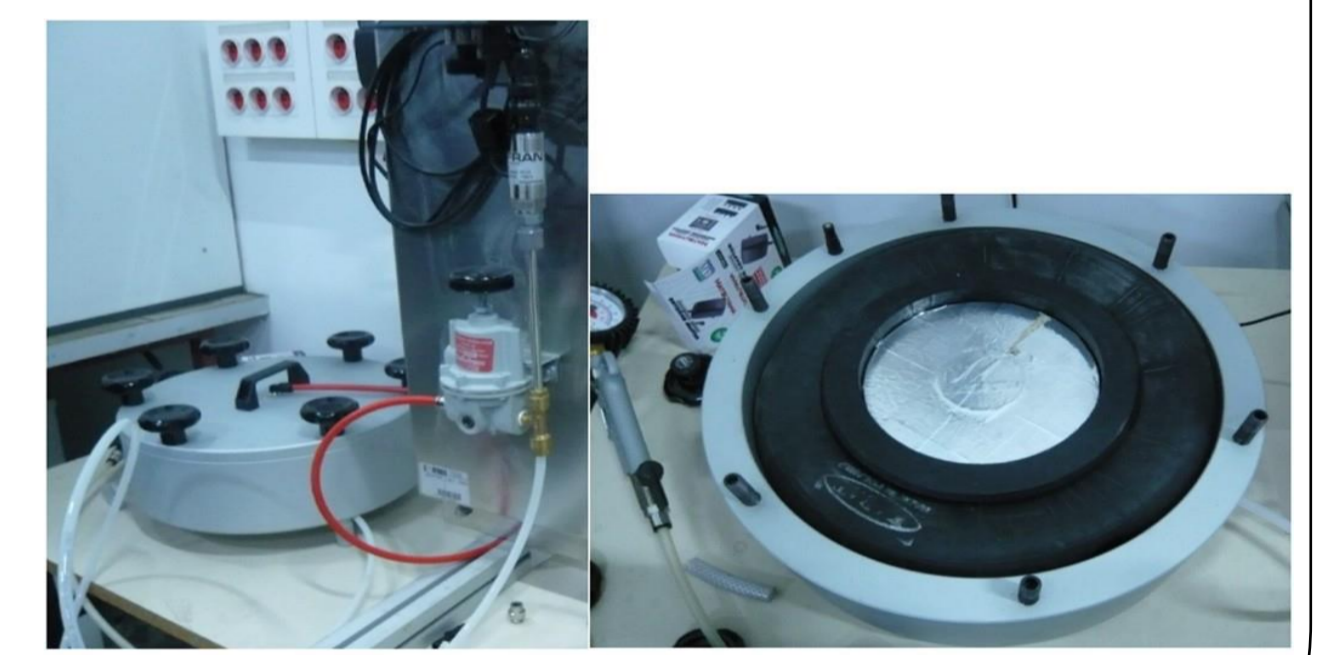


Illustration n°3: Perméamètre de type CEMBURO
A. Cellule de perméabilité / B. Cellule de perméabilité accueillant le mortier
Source: Matériaux & Techniques 108, 303 (2020)

V - Conclusion

Sur la base des résultats obtenus lors des essais en laboratoire, il est admis que le biofilm en composite de carbonate de calcium n'est pas endommagé après plusieurs heures sous une pression de 450 kPa. La bio-précipitation du carbonate de calcium en surface est un traitement possible pour la maintenance des ouvrages bétonnés. Cette méthode est prometteuse, elle pourrait être appliquée à la maintenance préventive des enceintes de réacteurs nucléaires. Le composite formé de carbonate de calcium doit réduire l'ouverture des micro fissures, améliorer la perméabilité du béton et également résister au cycle de pressurisation de la structure. Le procédé de réparation des microfissures par bio cicatrisation détient un potentiel non-négligeable pour participer à la maintenance préventive des enceintes de confinement et garantir leur perméabilité afin de maintenir la fonction de confinement, primordiale à la sûreté de l'installation. La bio cicatrisation est particulièrement adaptée en raison de sa robustesse dans le temps en comparaison des procédés actuels de réparation par résine chimique.

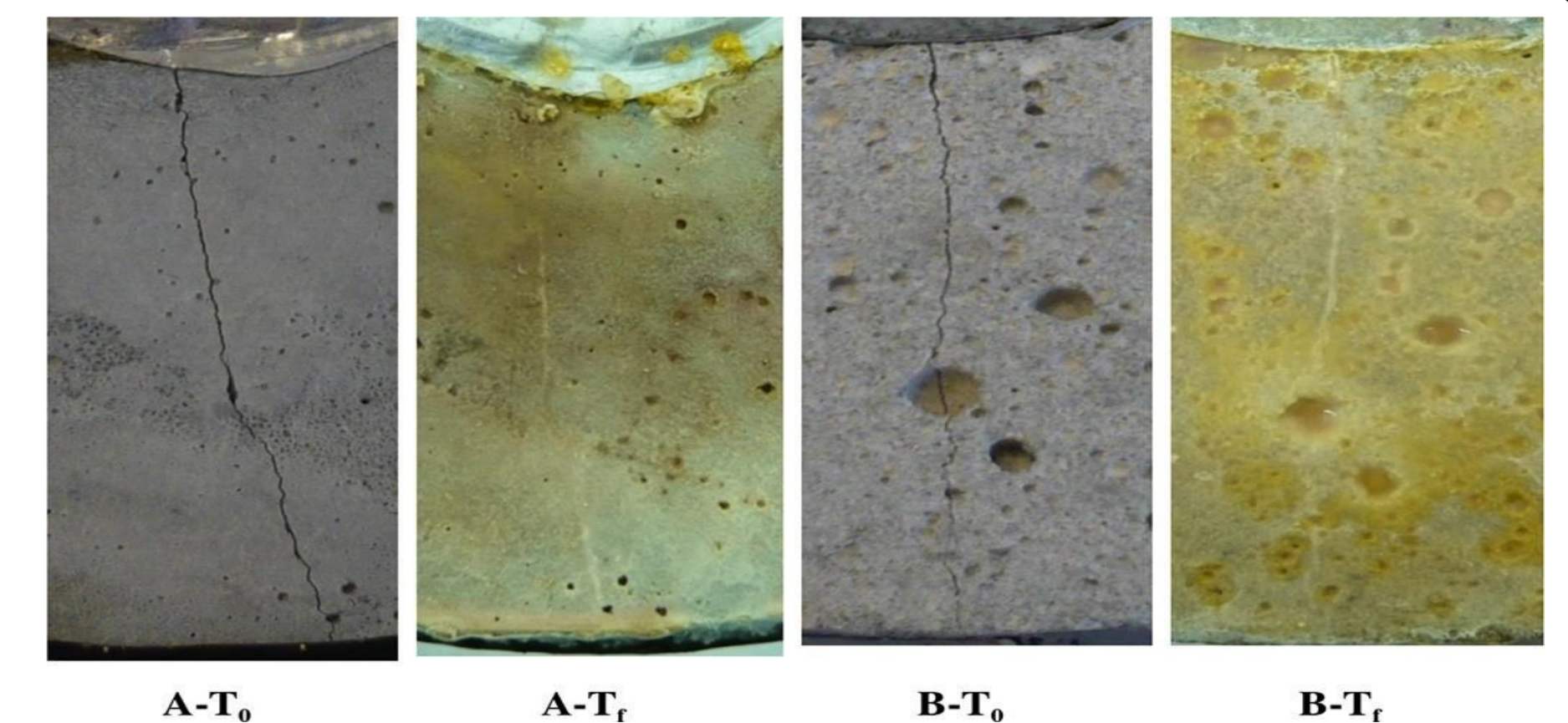


Illustration n°1 : Surface des mortiers A et B avant et après traitement par bioprécipitation
Source : Biocicatrisation : application à la réparation de mortiers âgés, Mater. Tech. 103, 207 (2015)

Bibliographie

1. J. Ducasse-Lapeyrusse, C. Lors, R. Gagné, D. Damidot, Biocicatrisation : application à la réparation de mortiers âgés, Mater. Tech. 103, 207 (2015)
2. Christine Lors, D. Damidot, L. Petit, N.C. Tran, A. Legrix, B. Masson, Application de la biocicatrisation à la réparation des microfissures au sein d'enceintes de réacteurs nucléaires, Matériaux & Techniques 108, 303 (2020)
3. W. De Muyneck, D. Debrouwer, N. De Belie, W. Verstraete, Bacterial carbonate precipitation improves the durability of cementitious materials, Cem. Concr. Res. 38, 1005-1014 (2008)
4. C. Lors, D. Damidot, L. Petit, A. Legrix, N.C. Tran, B. Masson, Bioprecipitation of a calcium carbonate biofilm composite on the surface of concrete for the maintenance of nuclear reactor enclosures, Constr. Build. Mater. 237, 117618 (2020)