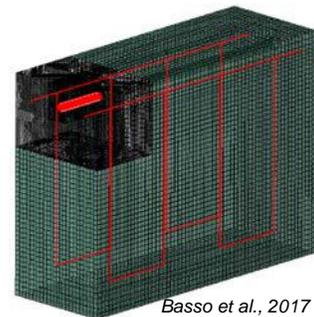
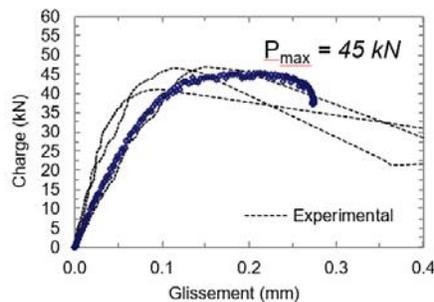


Actes de la 18^e édition des Journées Scientifiques

(RF)²B Regroupement Francophone pour la Recherche et la Formation sur le Béton

« Les nouveaux matériaux et les méthodes innovantes utilisés dans un
contexte de développement durable »



6 et 7 Juillet 2017

Université Laval
CRIB Québec



TABLE DES MATIÈRES

Programme des Journées pp. iv

Liste des affiches pp. viii

Articles

*UTILISATION DU BÉTON RECYCLÉ DANS LA FORMULATION DES
BÉTONS AUTO-COMPACTANTS* pp.1-11

Md El K. Bouarroudj^{A,B}, C. Colman^{A,B}, E. Robinet^A, Z. Zhao^A, F. Michel^A, L.
Courard^A, S. Remond^B, D. Bulteel^B

A : Laboratoire des Matériaux de Construction, Urban and Environmental
Engineering, – Université de Liège Belgique

B : IMT Lille Douai, Univ. Lille, EA 4515 LGCgE – Laboratoire de Génie
Civil et Géo Environnement, Département Génie Civil & Environnemental,
F-59000 Lille, France

*STRATEGIE MULTI-ECHELLE DE MODELISATION NUMERIQUE DE LA
FISSURATION DES STRUCTURES EN BETON ARME DE GRANDES
DIMENSIONS* pp. 12-22

C. Nader^A, P. Rossi^A, J-L. Tailhan^A

A : Institut Français des Sciences et Technologies des Transports, de
l'Aménagement et des Réseaux (IFSTTAR), Université Paris-Est

*VALORISATION DE LAITIERS D'ACIÉRIE DANS DES BLOCS DE
BÉTONS D'ENROCHEMENT* pp. 23-33

C. Perlot^A, H. Carré^A

A : Laboratoire des Sciences de l'Ingénieur Appliquées à la Mécanique et
au génie électrique, ISA BTP - Université de Pau et des Pays de l'Adour,
Anglet, France

*PRÉ-MÉLANGES DE SABLES NATURELS AVEC DE FAIBLES
PROPORTIONS DE SABLES DE BÉTONS RECYCLÉS : PROPRIÉTÉS
ET DOSAGES* pp. 34-42

R. Trauchessec^A, E. Ghorbel^B, A. Lecomte^A, O. Safiuallah^B, Z. Ben Aouda^A,
G. Wardeh^B

A : Équipe Matériaux pour le Génie Civil, Institut Jean Lamour - Université
de Lorraine, Nancy, France

B : Laboratoire de Mécanique et Matériaux du Génie Civil - Université de
Cergy-Pontoise, France



*ÉTUDE DE L'AUTOCICATRISATION DE MORTIERS CONTENANT DES
ADDITIONS REACTIVES* pp. 43-58

S. Fattahi^A, R. Gagné^A

A : Centre de recherche sur les infrastructures en béton (CRIB), Université de Sherbrooke, Québec, Canada

*FLUAGE DU BÉTON ET DU BÉTON PRÉCONTRAIT SOUS
CONDITIONS THERMO-HYGRO-MÉCANIQUES VARIABLES* pp. 59-69

H. Cagnon^A, V.N. Nguyen^B, T. Vidal^A, J.M. Torrenti^B, A. Sellier^A

A : Université de Toulouse; UPS, INSA; LMDC (Laboratoire Matériaux et Durabilité des Constructions); 135, avenue de Ranguel; F-31 077 Toulouse Cedex 04, France.

B : Institut français des sciences et technologies des transports, de l'aménagement et des réseaux (IFSTTAR), 14-20 Boulevard Newton - Champs-sur-Marne – 77447 Marne-la-Vallée Cedex 2, France.

*RÉCENTS DÉVELOPPEMENTS DANS LA RECHERCHE ET LES
SPÉCIFICATIONS SUR LES GRANULATS À BÉTON INCORPORANT
DES SULFURES DE FER* pp. 70-80

B. Fournier^A, J. Duchesne^A, A. Rodrigues^B

A : Département de géologie et de génie géologique, Université Laval, Québec, Canada

B : GHD Consultants Ltée, Québec, Canada

*EFFET DE LA PRÉSENCE DE VIDES SUR LA QUALITÉ DE
L'ADHÉRENCE D'UNE BARRE D'ARMATURE* pp. 81-89

P. Basso Trujillo^A, M. Jolin^A, B. Massicotte^B, B. Bissonnette^A

A : Centre de Recherche sur les Infrastructures en Béton, Université Laval, Québec, Canada

B : Centre de Recherche sur les Infrastructures en Béton, Polytechnique de Montréal, Québec, Canada

*AMELIORER L'EVALUATION DES STRUCTURES ENDOMMAGEES PAR
DES REACTIONS DE GONFLEMENT INTERNE A L'AIDE DE
MODELISATIONS PHYSICO-CHIMIQUES* pp. 90-98

S. Multon^A, A. Sellier^A

A : Université de Toulouse, Laboratoire Matériaux et Durabilité des Constructions, INSA - Université Paul Sabatier, Toulouse, France

*INFLUENCE DU TYPE DE FIBRES ET DE LEUR ORIENTATION SUR LA
FISSURATION ET LA PERMÉABILITÉ DU BÉTON ARMÉ SOLlicitÉ EN
TRACTION* pp. 99-117

T. Plagué^A, C. Desmettre^A, J.-P. Charron^A

A : Centre de Recherche sur les Infrastructures en Béton (CRIB), École Polytechnique, Montréal, QC, Canada



UNIVERSITÉ
LAVAL



Centre de recherche sur les
infrastructures en béton (CRIB)

PASSERELLE PIETONNE ISABEY-DARNLEY – UTILISATION DE
DALLES PREFABRIQUEES EN BFUP

pp. 118-143

É. Cantin-Bellemare^A, J.-P. Charron^B

A : Ville de Montréal, QC, Canada

B : Centre de Recherche sur les Infrastructures en Béton (CRIB), École
Polytechnique, Montréal, QC, Canada



PROGRAMME DU 6 JUILLET 2017

8h30 Accueil des participants

9h00 Mot de bienvenue et présentation du (RF)²B par Gilles Escadeillas

9h15 **Conférencier invité** : Jacques Marchand, SIMCO Technologies
Titre : L'ingénierie de la durabilité - Concevoir des structures qui
atteindront une durée de vie de 100 ans et plus

10h15 **Étude du comportement résiduel de structures atteintes par la RAG**
Farid Benboudjema (1), Georges Nahas (1, 2), Ejona Kishta (1)
(1) LMT (ENS Cachan, CNRS, Université Paris Saclay), France
(2) Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire, France

10h45 : Pause-café – (affiches)

11h15 **Mécanismes d'hydratation des liants à base de ciments alumineux
en système dilué - confrontation mesures expérimentales et
modélisation numérique**
Nicolas Maach (1), Jean-François Georgin (1), Judith Pommay (2)
(1) LGCIE – INSA de Lyon, France
(2) Kerneos, France

11h45 **Passerelle piétonne Isabey-Darnley – Utilisation de dalles
préfabriquées en BFUP**
Étienne Cantin-Bellemare (1), Jean-Philippe Charron (2)
(1) Ville de Montréal
(2) École Polytechnique de Montréal

12h15 Repas

13h45 **Utilisation de bétons recyclés dans la formulation de bétons
autocompactants**
Mohamed El Karim Bouarroudj (1,2), Charlotte Colman (1,2), Eva
Robinet (1), Zengfeng Zhao (1), Frédéric Michel (1) Luc Courard (1),
Sébastien Remond (2), David Bulteel (2)
(1) Laboratoire des Matériaux de Construction, Urban and Environmental
Engineering, – Université de Liège, Belgique
(2) IMT Lille Douai, Université de Lille, France

14h15 **Stratégie multi-échelle de modélisation numérique de la fissuration
des structures en béton armé de grandes dimensions**
Christian Nader, Pierre Rossi, Jean-Louis Tailhan
IFSTTAR, France



14h45 **Valorisation de laitiers d'aciérie dans des blocs de bétons d'enrochement**

Céline Perlot, Hélène Carré

Université de Pau et des Pays de l'Adour - laboratoire SIAME, France

15h15 **Mélange de sable naturel avec une faible proportion de sables de bétons recyclés : dosages et propriétés**

Romain Trauchessec (1), Elhem Ghorbel (2), André Lecomte (1), Omary Safiuallah (2), Zakaria Ben-Aouda (1), George Wardeh (2)

(1) Équipe Matériaux pour le Génie Civil, Institut Jean Lamour - Université de Lorraine, Nancy, France

(2) Laboratoire de Mécanique et Matériaux du Génie Civil - Université de Cergy-Pontoise, France

15h45 **Visite des laboratoires de l'Université Laval**

19h00 **Restaurant Le Cosmos** (terrasse), 2813 boulevard Laurier, Québec



PROGRAMME DU 7 JUILLET 2017

8h30 Accueil des participants

9h00 **Conférencier invité** : Luc Bédard, Association béton Québec (ABQ)
Titre : L'avenir de l'industrie du béton et l'intégration du développement durable

10h00 **Influence des additions cimentaires à forte teneur en chaux libre sur l'autocicatrisation naturelle des mortiers**
Salma Fattahi, Richard Gagné
Université de Sherbrooke

10h30 Pause-café (affiches)

11h00 **Fluage du béton et du béton précontraint sous conditions thermo-hygro-mécaniques variables**
Hugo Cagnon (1), V.N. Nguyen (2), T. Vidal (2), J.M. Torrenti (2), A. Sellier (1)
(1) LMDC, France
(2) IFSTTAR, France

11h30 **Récents développements dans la recherche et les spécifications sur les granulats à béton incorporant des sulfures de fer**
Benoit Fournier, Josée Duchesne et Andreia Rodrigues
CRIB, Université Laval

12h00 Repas

13h30 **Analyse du cycle de vie pour les infrastructures en génie civil : passé, présent et futur**
Ben Amor, Jean-Martin Lessard
CRIB, Université de Sherbrooke

14h00 **Calcul de la longueur de développement en présence de défauts**
Pasquale Basso (1), Marc Jolin (1), Bruno Massicotte (2)
(1) CRIB, Université Laval
(2) CRIB, École Polytechnique de Montréal

14h30 **Améliorer l'évaluation des structures endommagées par des réactions de gonflement interne à l'aide de modélisations physico-chimiques.**
Stéphane Multon, Alain Sellier
LMDC, France



15h00 **Influence de l'orientation et du type de fibres sur la fissuration et la perméabilité à l'eau du béton armé**

Thibault Plagué, Clélia Desmettre, Jean-Philippe Charron
École Polytechnique de Montréal

15h30 Clôture des Journées scientifiques

15h45 Réunion du Conseil d'orientation (interne)
Salle 3347, pavillon Alphonse-Desjardins



AFFICHES POUR LES JOURNÉES SCIENTIFIQUES DU (RF)2B

BÉDARD, Frédéric. *Renforcement à l'effort tranchant des dalles épaisses en béton en conditions de service*. Université Laval

COLMAN, Charlotte. *Residues de plâtre dans les fines de recyclage*. Université de Liège

ESSALIK, Samy-Joseph. *Nouvel essai annulaire adapté aux bétons à retrait compensé*. Université Laval

FAUCON, Samuel. *Réactions de gonflement interne (RAS et DEF) soumis à des chocs thermiques*. Université de Sherbrooke

FRECH-BARONET, Jessy. *Influence de l'humidité relative sur le comportement du fluage et de la relaxation de la pâte de ciment à l'échelle de la microstructure*. Université Laval

GAGNON, Antoine. *Conception et évaluation de la performance du béton projeté renforcé de fibres : concepts et défis*. Université Laval

HILT, Mélodie. *Production de béton en usine et développement durable : utilisation de technologie de contrôle continu*. Université Laval

MENU, Bruce-Ghandi. *Comportement différé des bétons au jeune âge*. Université Laval

MBINA, Mihindou. *Évaluation non-destructive de la qualité de l'adhérence entre deux bétons par la méthode de la réponse impulsionnelle (RI)*. Université de Sherbrooke

VU, Viet Anh. *Mur radiant : panneaux composite hybride bois et matériel inorganique*. Université Laval

MASOUD, Hosseinpoor. *Simulation numérique de l'écoulement du béton autoplaçant (BAP)*. Université de Sherbrooke

AHMED, Mostafa. *Nouvelle méthode pour quantifier la structuration des suspensions cimentaires*. Université de Sherbrooke

DIMA, Youness. *Caractérisation améliorée de l'écoulement des liants, ajouts cimentaires et liants alternatifs*. Université de Sherbrooke

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

Université Laval, Québec, Canada
6 et 7 juillet 2017

ÉTUDE DE L'AUTOCICATRISATION DE MORTIERS CONTENANT DES ADDITIONS REACTIVES

S. Fattahi^A, R. Gagné^A

A Centre de recherche sur les infrastructures en béton (CRIB), Université de Sherbrooke, Québec, Canada

RÉSUMÉ : Le but de ce projet de recherche est d'étudier l'effet d'un apport supplémentaire en Portlandite sur le potentiel d'autocicatrisation des mortiers. Des ajouts avec différents teneurs en chaux libre sont introduits. Les ajouts proposés sont un agent expansif interne avec une teneur élevée en chaux libre (58% de CaO libre) et deux cendres volantes à biomasse ayant des teneurs différentes en chaux libre de 9% et 17%. Les dosages en ajouts ont été choisis pour obtenir des mortiers ayant diverses teneurs en Portlandite. Les résultats de cette étude ont montré que la teneur en chaux libre du réactif ajouté au mortier influence directement sa teneur en Portlandite à l'âge de 28 jours. La carbonatation étant le mécanisme d'autocicatrisation naturel le plus important, l'augmentation de la teneur en Portlandite de la matrice cimentaire peut activer ce mécanisme et, par conséquent, obtenir un matériau cimentaire avec un fort potentiel d'autocicatrisation (un taux de cicatrisation apparente de 83% pour une grande fissure de 293 µm).

1. INTRODUCTION

Le potentiel d'autocicatrisation peut constituer une composante importante de la durabilité des structures en béton. Certaines études ont relevé une diminution importante des propriétés de transport des bétons fissurés grâce à l'autocicatrisation. C'est notamment le cas de la perméabilité à l'eau, de la perméabilité aux ions chlore (Sahmaran *et al.*, 2008 ; Jacobsen *et al.*, 1996) et de la perméabilité à l'air (Argouges et Gagné, 2010). Certains auteurs se sont intéressés à l'étude du recouvrement des propriétés mécaniques tels que la résistance à la compression et le module élastique (Desmettre, 2011 ; Sahmaran *et al.*, 2008).

Plusieurs études ont été menées pour expliquer la formation des produits qui peuvent combler les fissures, et tester leur efficacité en termes de gain d'intégrité du béton, d'étanchéité et des propriétés mécaniques. Différents mécanismes ont été proposés. Ils diffèrent les uns des autres par les réactifs mis en jeu, les produits de colmatage et la cinétique de développement de la cicatrisation de la fissure.

Les deux mécanismes principaux d'autocicatrisation sont : 1- L'hydratation différée des grains de ciment anhydres et 2- La carbonatation (Edvardsen 1999, Jacobsen et coll. 1998). Le premier mécanisme repose sur la formation de nouveaux produits d'hydratation formés grâce à la pénétration de l'eau, via les fissures, jusqu'aux grains de ciment encore non hydratés. Le second mécanisme repose sur la formation progressive de calcite (CaCO₃) dans la fissure. Le CO₂ et l'eau pénétrant dans la fissure engendrent une réaction de carbonatation de la Portlandite (Ca(OH)₂). Les deux mécanismes contribuent progressivement au remplissage du volume de la fissure par la formation de composés stables. Selon les conditions d'exposition

et l'ouverture de la fissure, la cicatrisation de la fissure peut être partielle ou complète (Argouges et Gagné, 2010).

La cinétique de l'autocicatrisation est influencée par l'ouverture initiale de la fissure. Les fissures fines (<100 μm) cicatrisent rapidement le premier mois, puis plus lentement par la suite. Dans les fissures plus larges (>100 μm), l'autocicatrisation est plus progressive. Néanmoins, le phénomène d'autocicatrisation est toujours ralenti avec la formation progressive des produits dans les fissures. Les réactifs présents dans la pâte de ciment (les grains de ciment anhydre et la Portlandite) sont plus difficiles d'accès. Ainsi, les fissures larges ne se cicatrisent pas complètement et la cinétique de cicatrisation diminue rapidement au cours du temps (Argouges et Gagné, 2010).

L'importance du phénomène de l'autocicatrisation pour la durabilité du béton est à l'origine de plusieurs études visant l'augmentation du potentiel d'autocolmatage des fissures des bétons. Différentes solutions sont proposées. Une des solutions étudiées est l'introduction d'agents autocicatrisants dans la matrice cimentaire qui s'activent par l'ouverture d'une fissure. Ces matériaux peuvent être une résine ou un polymère. Ils sont introduits dans le matériau cimentaire lors du malaxage dans des tubes ou des capsules constitués d'un matériau fragile tels que le verre ou la porcelaine (Van Tittelboom *et al.*, 2011). D'autres études proposent l'augmentation de la teneur de la matrice cimentaire en réactifs nécessaires pour l'un ou l'autre des mécanismes d'autocicatrisation, et ce en introduisant des ajouts cimentaires et granulaires. Une autre solution proposée est d'exploiter le potentiel de certains microorganismes (bactéries) pour favoriser la précipitation de composés chimiques, notamment la calcite, dans les fissures (Van Tittelboom *et al.*, 2010). D'autres solutions innovatrices ont été proposées telles que l'introduction des fibres en alliages ou polymères à mémoire de forme. Ces matériaux ont tendance à se contracter ou à rétrécir sous des conditions bien définies. Une force de contraction est alors générée. Elle permet la fermeture de la fissure. Le but commun de toutes ces études est de trouver une technique rapide, efficace et peu coûteuse qui permettrait d'augmenter le potentiel d'autocicatrisation du béton.

2. BUT DE LA RECHERCHE

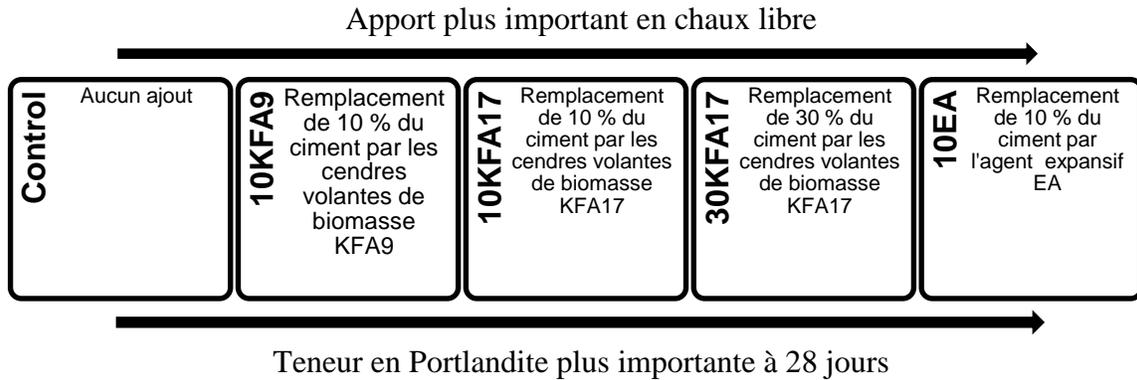
Le but global de ce projet est d'étudier l'influence de la variation de la teneur en Portlandite sur l'évolution du potentiel d'autocicatrisation. Des inclusions réactives ayant différents teneurs en oxyde de calcium libre sont introduites dans la formulation des mortiers, en remplacement du ciment. L'hydratation de la CaO libre produit de la Portlandite qui sera une réserve de réactifs pour le mécanisme d'autocicatrisation par carbonatation. L'analyse thermogravimétrique permet de déterminer la teneur en Portlandite de chaque mortier au moment de la fissuration. Ceci permettra d'établir une relation potentielle entre la teneur en Portlandite des mortiers et leur potentiel d'autocicatrisation. Les inclusions réactives utilisées sont un agent d'expansion interne à base de chaux libre (EA) et des cendres volantes de biomasse avec différents teneurs en chaux libre (KFA9 et KFA17).

Afin d'atteindre cet objectif, une technique de mesure et de suivi de l'autocicatrisation des fissures des mortiers qui a été conçue à l'Université de Sherbrooke a été utilisée. Il s'agit de mesurer le débit d'air dans une fissure à différentes périodes d'autocicatrisation. Les essais sont faits sur des éprouvettes en mortier fissurées. Une relation polynomiale de troisième degré a été établie entre le débit d'air dans une fissure et son ouverture apparente. Cette technique a été conçue et perfectionnée par Gagné et Argouges (Argouges 2010; Gagne and Argouges 2012). Des essais de caractérisation seront également faits sur les inclusions réactives, les mortiers étudiés et les produits de cicatrisation formés dans les fissures. Ces analyses permettront de mieux comprendre les mécanismes d'autocicatrisation et les modes d'action des additions réactives.

3. PROGRAMME EXPÉRIMENTAL

Un programme de recherche a été établi pour étudier l'effet de l'apport additionnel de chaux libre sur le potentiel d'autocicatrisation des mortiers. Des ajouts avec différents taux de chaux libre sont introduits. Les ajouts proposés sont deux cendres volantes à biomasse ayant des teneurs différentes en chaux libre de

9% et 17% (KFA9 et KFA17) et un agent expansif interne avec une teneur élevée en chaux libre (58%). Les dosages en ajouts ont été choisis pour obtenir des mortiers ayant divers teneurs en Portlandite.



3.1 Propriétés des matériaux

Le ciment utilisé dans tous les mélanges est un ciment Portland canadien à usage général (GU) (semblable à CEM1 et ASTM Type 1) qui satisfait toutes les exigences de la norme CSA actuelle (CSA A3001-08). La composition chimique et les propriétés physiques du ciment sont présentées dans le Tableau 1. Le sable utilisé est un sable de silice pure d'Ottawa qui passe par un tamis N ° 20 (850 μ) et retenu par un tamis n ° 30 (600 μ). Sa densité est de 2,65.

Le tableau présente également les caractéristiques physico-chimiques des cendres volantes de biomasse KFA9 et KFA17 et de l'agent expansif EA.

Tableau 1. Propriétés des matériaux

	Ciment	EA	KFA9	KFA17
SiO₂	20,8	13,4	19	20,2
Al₂O₃	4,3	5,8	10,6	11,0
Fe₂O₃	2,4	2,1	1,9	1,9
CaO	62,5	60,2	52,5	52,4
MgO	2,2	2,0	2,3	2,1
SO₃	3,5	0,6	5,4	4,7
Chaux libre		58	9	17
Finesse Blaine (m²/kg)	397		1049	958
Densité (g/cm³)	2,65	3,14	3,05	3,03

Les teneurs en chaux libre des ajouts ont été déterminées par extraction de la chaux avec de l'éthylène glycol suivi par un titrage de la suspension avec l'acide chlorhydrique (Javellana et JAWED, 1982). Ce test consiste à chauffer l'éthylène glycol à une température de 80 à 100 ° C et à mélanger pendant 5 minutes avec 1 g d'un échantillon de l'ajout. La suspension est ensuite filtrée et titrée avec du HCl 0,1005 N. Il est nécessaire de noter que cette méthode permet la dissolution de Ca(OH)₂ avec le CaO. Ainsi, la teneur réelle en chaux libre a été calculée en soustrayant la teneur en Portlandite (calculée par ATG) du résultat obtenu par la méthode de l'éthylène glycol.

3.2 Formulations des mortiers et caractéristiques des échantillons

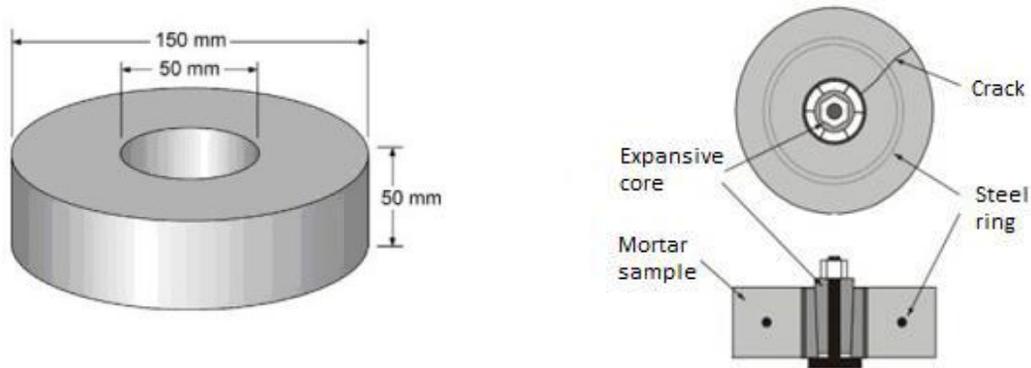
La composition et le processus de malaxage des mortiers sont conformes à la norme ASTM C109-C109M. Les proportions de mélanges et les propriétés mécaniques des mortiers sont présentées dans le Tableau

2. Chaque mélange était d'environ 8 litres et contient 2500 g de ciment. Les autres composants des mélanges sont dosés selon les proportions présentées dans le tableau 2. Les mortiers ont été mélangés dans un malaxeur à axe vertical de 10 litres de capacité. Cinq mortiers ont été coulés : 1- Mortier Control: le mortier référence qui ne contient aucun ajout. 2- Le mortier 10EA: dans ce mortier, 10% de ciment est remplacé par l'agent d'expansion interne (EA). 3- Le mortier 10KFA9: dans ce mortier, 10% de ciment est remplacé par des cendres volantes Kruger avec 9% de chaux libre (KFA9). 4- Le mortier 10KFA17: dans ce mortier, 10% de ciment est remplacé par des cendres volantes Kruger contenant 17% de chaux libre (KFA17). 5- Le mortier 30KFA17 : 30% du ciment est remplacé par des cendres volantes avec 17% de chaux libre (KFA17).

Tableau 2. Formulations et résistances à la compression à 28 jours des mortiers

	Control	10EA	10KFA9	10KFA17	30KFA17
Eau / Ciment	0,485				
Sable / Ciment	2,75				
EA (%)	-	10	-	-	-
KFA9 (%)	-	-	10	-	-
KFA17 (%)	-	-	-	10	30
Résistance à la compression à 28 jours (MPa)	35	32	33	30	29

Les échantillons de mortier conçus pour les essais de perméabilité à l'air sont en forme d'anneau. Le rayon extérieur de l'anneau est de 150 mm, le rayon intérieur est de 50 mm et la hauteur de l'échantillon est de 50 mm (Figure 1a). Les spécimens sont armés d'une bague en acier. Elle permet de préserver la cohésion globale après la fissuration de l'échantillon [Gagné et Argouges, 2012]. Immédiatement après le démoulage, les échantillons sont conservés dans une chambre humide (23 °C et 100% d'humidité relative) jusqu'à l'âge de 28 jours. À la fin du mûrissement et avant de procéder la fissuration, les échantillons ont été séchés pendant 24 heures dans un four ventilé maintenu à 40 °C.



a) Dimensions de l'éprouvette

b) Dispositif de fissuration

Figure 1. Détails des éprouvettes de mortier et du dispositif de fissuration

3.3 Fissuration des éprouvettes et mesures de l'ouverture initiale des fissures et du débit d'air

La fissuration s'effectue via un coeur expansif. Le dispositif de fissuration est représenté à la Figure 1b. Le coeur expansif se compose de six pétales coniques en acier dans lesquels glisse un cône en acier. Il est installé dans le centre vide de l'échantillon en forme d'anneau et retenu par un anneau en PVC mince et déformable. Il s'agit d'appliquer une tension contrôlée causée par la pénétration du cône dans le noyau expansif. Cette technique permet d'obtenir une ouverture contrôlée de la fissure.

Après la fissuration, l'ouverture de la fissure est mesurée géométriquement à l'aide d'un vidéomicroscope. Ensuite, on procède à la mesure du débit d'air initial. Le dispositif de mesure est une cellule spécialement conçue pour mesurer le débit d'air sur des échantillons dont la forme est représentée sur la Figure 1. Cela permet une mesure précise du débit d'air à travers une fissure dans des conditions d'écoulement bien contrôlées : température et gradient de pression constant [Gagné et Argouges, 2012]. Les pressions absolues en amont et en aval sont maintenues constantes à 150 kPa et 100 kPa \pm 5 kPa (pression atmosphérique), respectivement. Le débit aval est mesuré par l'un des trois débitmètres à bille (rotamètre).

Il est facile de localiser une fissure et de mesurer son ouverture immédiatement après la fissuration. L'estimation géométrique de l'ouverture par le vidéomicroscope est dans ce cas représentative de la section transversale de la fissure sur toute la hauteur de l'échantillon. Cependant, après le stockage dans une chambre humide, l'autocicatrisation commence et les dépôts sont formés au hasard sur les côtés de la fissure. Il devient presque impossible de mesurer la largeur géométrique résiduelle. La mesure du débit d'air permet de déduire une estimation de l'ouverture apparente de la fissure. Une étude réalisée à l'Université de Sherbrooke a établi une relation entre l'ouverture de la fissure (w) et le débit d'air à travers la fissure (Q). Elle a été obtenue par interpolation des résultats de mesure de l'ouverture initiale des fissures fraîches par le vidéomicroscope et le flux d'air correspondant. Le coefficient de corrélation est assez proche de 1. La courbe résultante montre qu'il existe une relation de polynôme de degré 3 entre le débit et l'ouverture initiale ($Q = f(w)$). À partir d'un débit d'air expérimental mesuré Q , l'ouverture apparente, W_a , est calculée à partir des racines de l'équation. 1. Cette équation n'est valable que pour les conditions expérimentales spécifiques utilisées pour ce projet (surface du plan de fissure: 50 x 50 mm, gradient de pression: 50 kPa) [Gagné et Argouges, 2012]

$$Q = -1.10^{-7} \cdot W_a^3 + 0.0003 \cdot W_a^2 - 0.0025 \cdot W_a \quad (\text{Équation 1})$$

3.4 Teneur en Portlandite

L'étude de l'autocicatrisation par mesure de débit d'air dans les fissures établit les tendances de la cinétique cicatrisation des fissures. Pour expliquer ces tendances, les mortiers sont analysés pour déterminer les quantités de Portlandite par gramme de mortier au moment de la fissuration. Les analyses ont été faites sur des échantillons de mortier prélevés dans des cubes de mortier de 50 mm x 50 mm x 50 mm. Les cubes de mortier ont été coulés à partir des mêmes mortiers qui ont servi à fabriquer les anneaux de mortier utilisés pour étudier l'autocicatrisation. Ils sont également conservés dans les mêmes conditions dans une chambre humide (100% HR et 23 °C). Après 28 jours de mûrissement, les cubes de mortier ont été séchés pendant 24 heures dans un four à 40 °C. Juste avant l'analyse, un petit spécimen est prélevé sur le centre du cube et finement broyé.

Une analyse thermogravimétrique a été effectuée sur ces échantillons. Elle permet d'obtenir la variation de la perte de masse avec une augmentation de la température de 50 °C à 1000 °C avec un taux d'augmentation de 10 °C / min dans un environnement de gaz inerte (argon). Les données obtenues à partir de l'analyse thermogravimétrique ont été utilisées pour calculer la quantité de Portlandite par gramme de mortier. La courbe thermogravimétrique (TGA) représentant la perte de poids dynamique d'un échantillon, avec l'augmentation de température, est obtenue (Figure 2). La courbe dérivée thermogravimétrique (DTGA) correspondante est souvent calculée pour mieux identifier les modifications. Sur la base d'un travail bibliographique, à chaque espèce présente dans l'échantillon est associé à un pic DTGA et une plage de température de décomposition. Le pic correspondant à la déshydratation de Portlandite se produit dans une plage de température [400 °C, 600 °C]. Même si la perte d'eau liée de la décomposition du C-S-H se produit principalement de 180 à 300 °C, une perte d'eau du C-S-H se produit également dans cette plage de température et au-delà. Pour quantifier la perte de masse associée à la Portlandite "la méthode tangente" a été utilisée. La teneur en Portlandite a donc été quantifiée en mg / g de mortier par l'équation :

$$\text{Teneur en portlandite} = \frac{\delta_m(\text{portlandite})}{m_{\text{échantillon}}} \times \frac{M_{Ca(OH)_2}}{M_{H_2O}} \quad (\text{Équation 2})$$

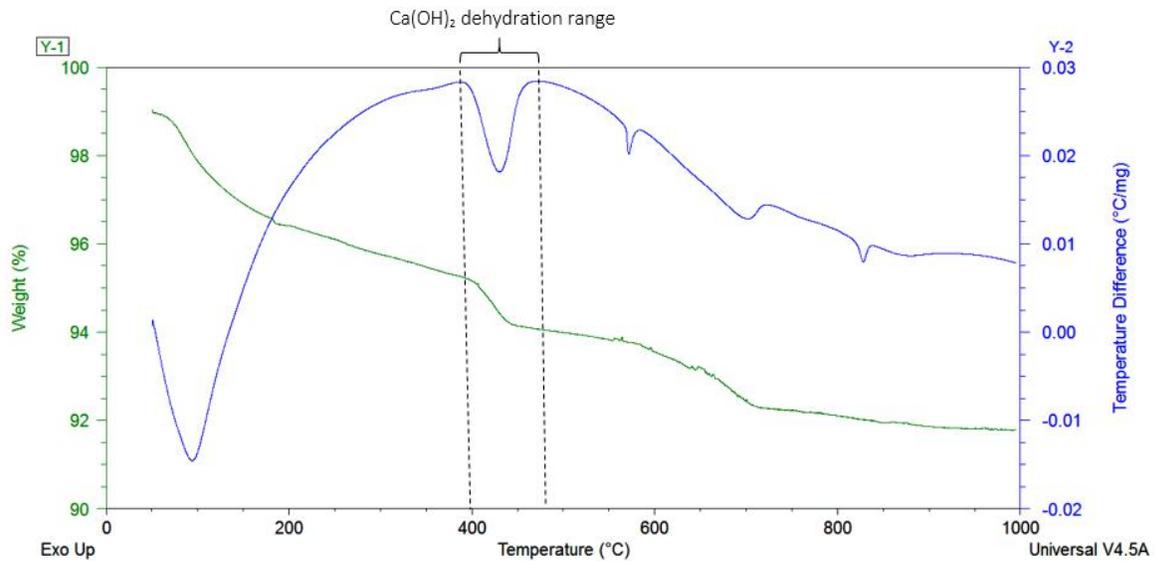


Figure 2. Détermination de la teneur en Portlandite à partir de l'analyse thermogravimétrique

Où: δ_m (Portlandite) est la perte de poids due à l'évaporation de l'eau du Portlandite, $m_{\text{échantillon}}$ est le poids de l'échantillon à température ambiante (g), $M_{Ca(OH)_2}$ est la masse molaire de Portlandite et M_{H_2O} la masse molaire d'eau ($g \cdot mol^{-1}$). L'analyse thermogravimétrique et les calculs de la teneur en Portlandite ont été effectués au même âge de fissuration pour chaque mortier (28 jours). Trois tests ont été effectués pour chaque échantillon de mortier. L'analyse thermique gravimétrique et les calculs du contenu de la Portlandite ont été effectués au même âge de fissuration pour chaque mortier (28 jours). Le test a été répété trois fois pour chaque mortier.

3.5 Analyse au MEB des produits de cicatrisation

Un microscope électronique à balayage couplé à une micro-analyse par rayons X (SEM-EDS) est utilisé pour étudier les produits formés dans les fissures cicatrisées après 12 mois d'autocicatrisation. La partie de l'échantillon contenant la fissure est coupée et séparée du reste. Ensuite, la fissure est ouverte pour exposer ses surfaces intérieures recouvertes de produits autocicatrisants (Figure 3). Les observations de SEM-EDS ont permis d'obtenir rapidement des informations sur la morphologie et la composition élémentaire des produits.



Figure 3. Préparation des surfaces internes des fissures cicatrisées pour observation au MEB

4. RÉSULTATS

4.1 Évolution du débit d'air et des ouvertures apparentes

Au total, 11 échantillons ont fait l'objet de cette étude. Les échantillons de mortier sont fissurés à l'âge de 28 jours. Les ouvertures initiales des fissures varient de 154 μm à 277 μm . L'évolution en fonction du temps, du débit d'air dans les fissures ainsi que leurs ouvertures apparentes de 0 à 12 mois sont présentés dans le **Error! Reference source not found.**. La dernière colonne du tableau présente l'épaisseur apparente finale de cicatrisation, après 12 mois d'autocicatrisation. L'épaisseur des produits de cicatrisation est la différence entre l'ouverture apparente initiale et finale des fissures ($W_0 - W_a$)

4.2 Validation de la relation entre le débit d'air et l'ouverture apparente des fissures

Pour une fissure donnée, l'ouverture initiale mesurée géométriquement avec le microscope vidéo (W_0) de la fissure et l'ouverture apparente à $t = 0$ devraient avoir approximativement les mêmes valeurs. La Figure 4 montre la relation expérimentale entre ces deux paramètres. Pour une fissure donnée, il existe toujours un écart entre les valeurs mesurées et les valeurs calculées. Les causes de ces écarts peuvent être l'erreur de mesure du débit d'air et l'imprécision sur l'ouverture moyenne des fissures mesurée avec le vidéomicroscope. Il existe une bonne corrélation entre ces deux paramètres ($R^2 = 0,9618$). La pente de la ligne de tendance est de 0,9836, ce qui indique que, dans l'ensemble, la différence entre l'ouverture apparente et l'ouverture initiale mesurée géométriquement d'une fissure à $t = 0$ est inférieure à 2%.

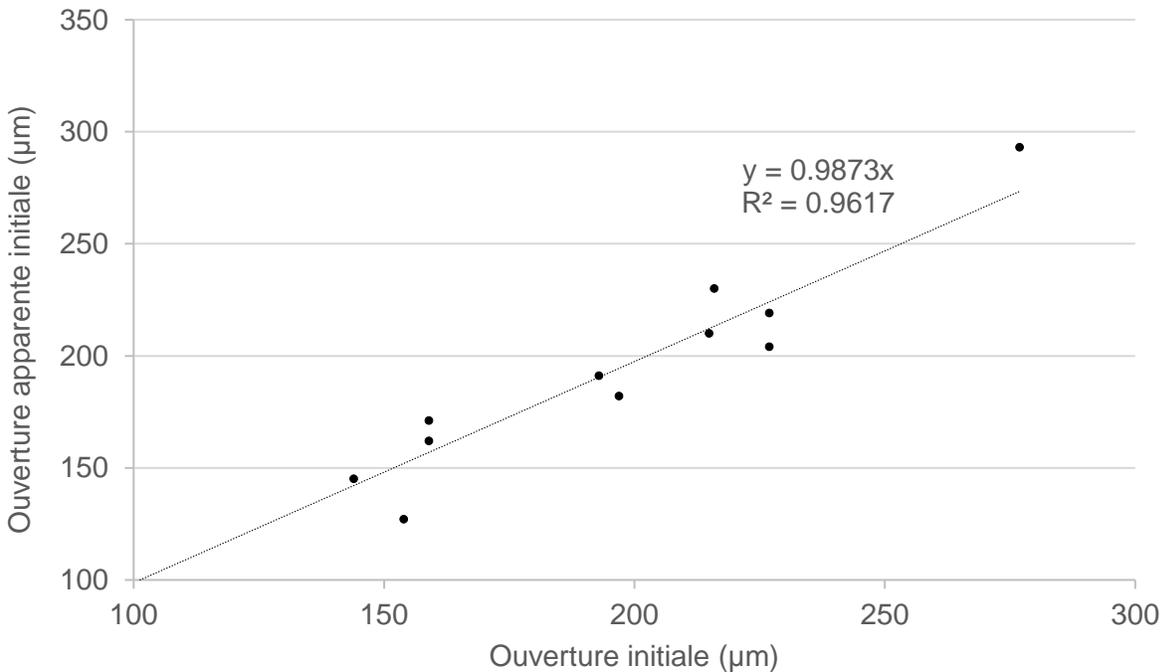


Figure 4. Relation entre l'ouverture apparente et l'ouverture initiale mesurée géométriquement à $t=0$

Tableau 3. Mesures de débit d'air et calcul des ouvertures apparentes

Échantillon	Ouverture initiale, W_0 (μm)	Débit d'air (l/min)						Ouverture apparente, W_a (μm)						Épaisseur apparente moyenne de cicatrisation (μm)						Taux de cicatrisation moyen après 12 mois (%)
		Temps d'autocicatrisation (mois)						Temps d'autocicatrisation (mois)						Temps d'autocicatrisation (mois)						
		0	1	3	6	12		0	1	3	6	12		1	3	6	12			
Control-1	193	9,80	7,00	4,22	1,72	1,7	191	161	126	81	81	29	70,5	106,5	106	50%				
Control-2	216	14,1	11,0	6,37	4,35	4,36	230	202	154	127	128									
10KFA9-1	215	11,8	9,83	8,16	6,19	6,15	210	192	174	151	151	21,5	34,5	46	46	24%				
10KFA9-2	159	7,8	5,74	5,12	5,11	5,11	171	146	138	138	138									
10KFA17-1	227	11,1	7,75	5,91	5,42	3,03	204	170	148	142	107	48,5	71	82	106,5	61%				
10KFA17-2	144	5,65	1,75	0,88	0,44	0,18	145	82	59	43	29									
30KFA17-1	197	8,87	3,67	1,80	0,19	0,01	182	117	83	30	11	53,5	83,5	119	143,5	93%				
30KFA17-2	154	4,3	1,87	0,87	0,39	0,01	127	85	59	41	11									
10EA-1	277	22,5	13,30	11,7	7,76	0,92	293	223	209	170	60									
10EA-2	159	7,08	3,67	1,50	1,36	0,07	162	117	76	73	20	53	81	104	189	84%				
10EA-3	227	12,8	8,08	5,65	3,81	0,14	219	174	145	119	26									

4.3 Cinétique d'autocicatrisation des mortiers

4.3.1 Mortier de référence

La Figure 5 montre l'évolution avec le temps des ouvertures apparentes des fissures du mortier de référence. Les fissures du mortier de référence ont des ouvertures initiales de 191 μm et 230 μm . Après six mois d'autocicatrisation les ouvertures apparentes diminuent de 110 μm et 102 μm , respectivement. Les ouvertures apparentes des fissures sont restées stables entre 6 et 12 mois.

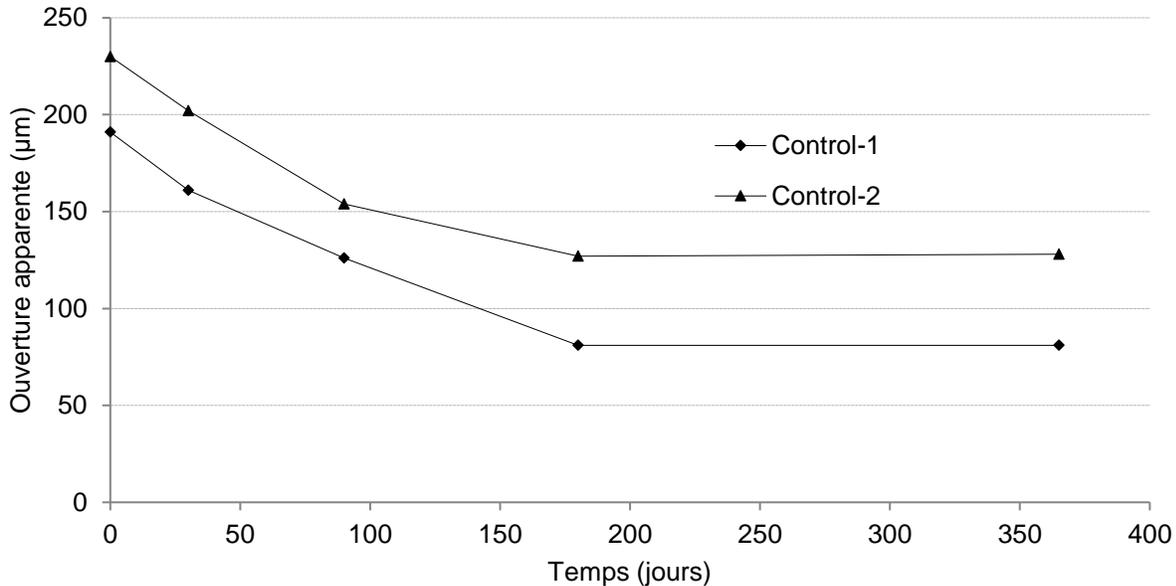


Figure 5. Évolution avec le temps des ouvertures apparentes des fissures du mortier de référence

4.3.2 Mortier 10KFA9

La Figure 6 montre l'évolution avec le temps des ouvertures apparentes des fissures du mortier 10KFA9. Les fissures étudiées sont : 10KFA9-1 ayant une ouverture apparente initiale de 210 μm et 10KFA9-2, plus fine, avec une ouverture apparente initiale de 171 μm . La fissure large a une cinétique de cicatrisation plus rapide que la plus mince. Après le premier mois de stockage, 10KFA9-1 diminue de 18 μm et 10KFA9-2 diminue de 25 μm . Après 6 mois, les fissures ne diminuent que de 59 μm et 33 μm respectivement. Les ouvertures apparentes des fissures n'ont montré aucun changement pendant les derniers 6 mois d'autocicatrisation. Le remplacement de 10% de ciment par les cendres volantes de biomasse KFA9 ayant une teneur en chaux libre de 9% n'a pas d'effet positif sur le potentiel d'autocicatrisation du mortier.

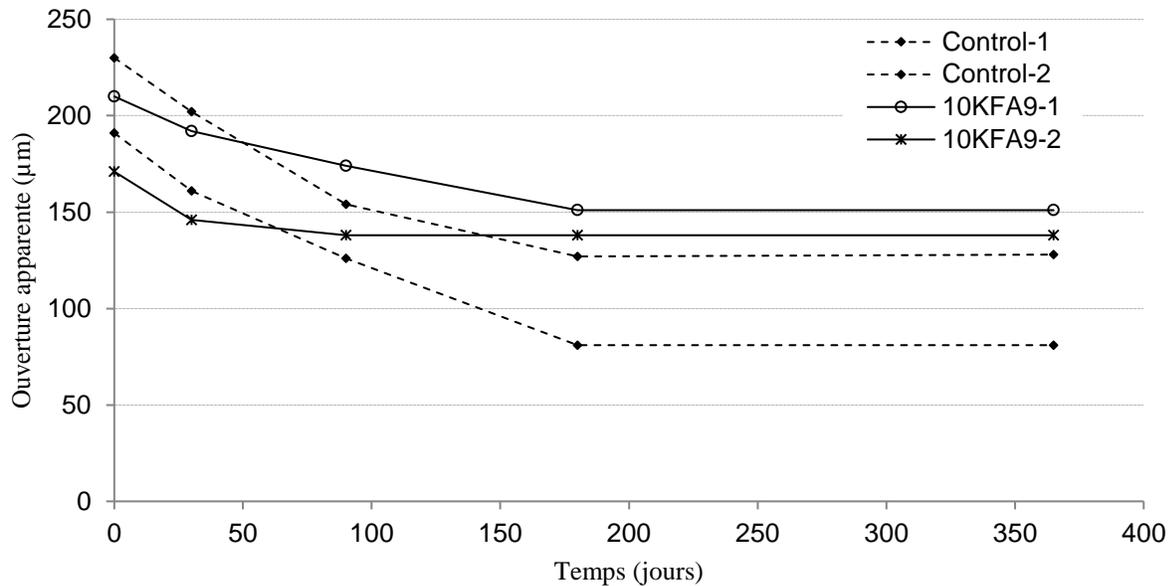


Figure 6. Évolution avec le temps des ouvertures apparentes du mortier 10KFA9.

4.3.3 Mortier 10KFA17

La Figure 7 montre la cinétique d'autocicatrisation du mortier 10KFA17. Deux fissures sont étudiées. Leurs ouvertures apparentes initiales sont de 204 μm (10KFA17-1) et 145 μm (10KFA17-2). Après 6 mois de stockage, les ouvertures apparentes ont diminué respectivement de 62 μm et 102 μm. Contrairement au mortier témoin, la cicatrisation des fissures du mortier 10KFA17 continue au-delà des six premiers mois de stockage. Entre 6 et 12 mois, l'autocicatrisation est plus importante pour la plus grande fissure (35 μm) que la plus petite (14 μm). Dans l'ensemble, après 12 mois d'autocicatrisation, les taux de cicatrisation respectifs sont de 48% et 80%.

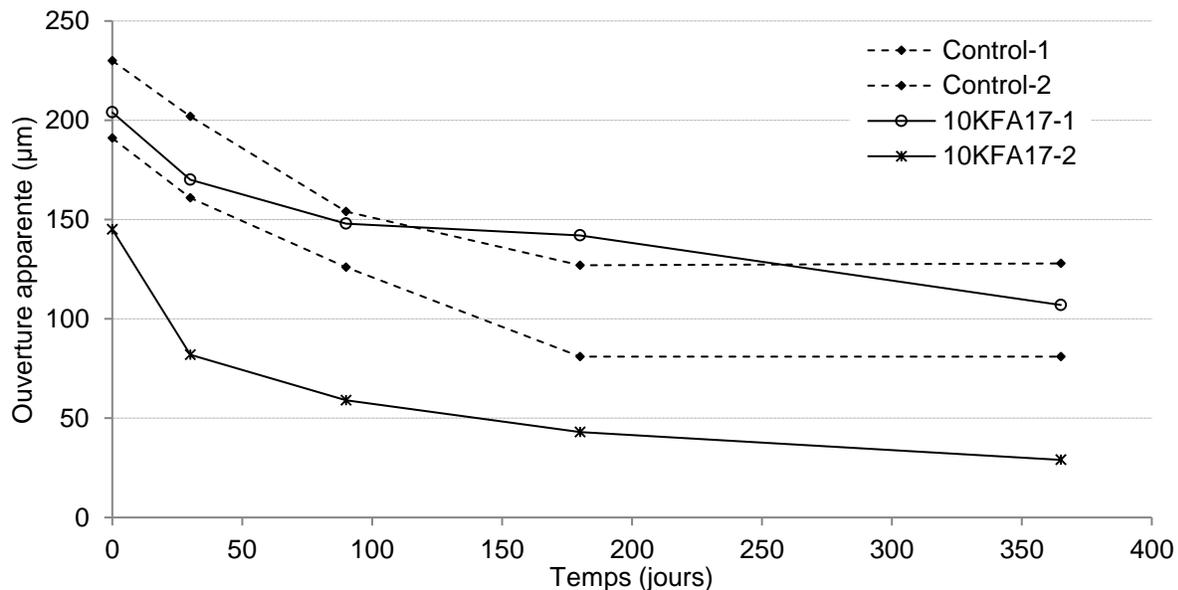


Figure 7. Évolution avec le temps des ouvertures apparentes du mortier 10KFA17

4.3.4 Mortier 30KFA17

La Figure 8 montre l'évolution avec le temps de cicatrisation des ouvertures apparentes de deux fissures de mortier 30KFA17. La grande fissure a une ouverture apparente initiale de 182 μm . La petite est de 127 μm . Le mortier 30KFA17 a montré une cinétique accélérée d'autocicatrisation. Après les 6 premiers mois de stockage, les ouvertures apparentes des fissures diminuent respectivement de 152 μm et 86 μm . Entre 6 et 12 mois, la cicatrisation continue avec un rythme beaucoup plus lent.

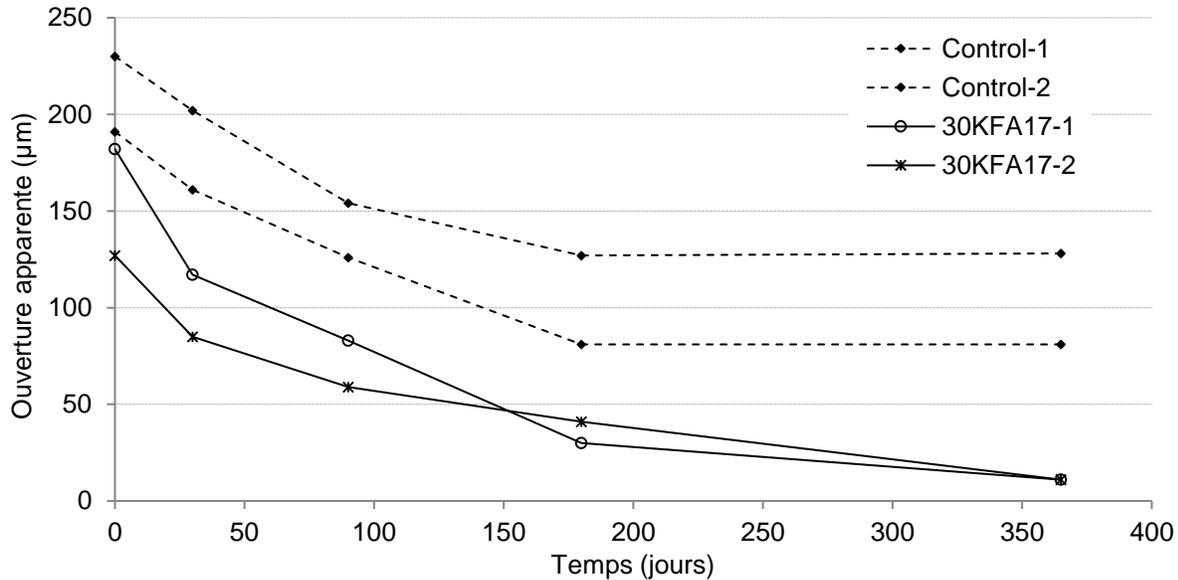


Figure 8. Évolution avec le temps des ouvertures apparentes du mortier 30KFA17

Après 12 mois d'autocicatrisation, les ouvertures apparentes des fissures sont réduites à 11 μm . Les taux de cicatrisation finaux sont de 94% pour la grande fissure et 91% pour la petite. Ces taux de guérison sont significativement plus élevés que ceux des fissures de mortier de référence.

4.3.5 Mortier 10EA

Trois fissures du mortier 10EA ont été étudiées (Figure 9). La fissure 10EA-1 a une ouverture apparente initiale de 293 μm . Elle montre une cicatrisation rapide le premier mois de stockage dans une chambre humide. Son ouverture apparente diminue de 70 μm pendant cette première période. Entre 1 et 6 mois, la diminution devient beaucoup plus lente avec une cinétique similaire à celle des fissures du mortier de référence. Cependant, entre 6 et 12 mois, la cicatrisation de la fissure est réactivée. L'ouverture apparente diminue de 110 μm pendant cette période. Ce comportement diffère de celui des fissures du mortier de référence (Control) dont les ouvertures des fissures se stabilisent après les six premiers mois d'autocicatrisation. L'ouverture apparente finale de la fissure après 12 mois de stockage est de 60 μm . Les fissures 10EA-2 et 10EA-3 ont des ouvertures apparentes initiales plus petites, respectivement de 162 μm et 219 μm . La cicatrisation de ces fissures est plus lente pour le premier mois. Entre 1 et 12 mois, la cinétique de l'autocicatrisation est comparable à celle de la fissure 1-10EA. Les ouvertures apparentes finales, après 12 mois d'autocicatrisation, sont respectivement de 20 μm et 26 μm .

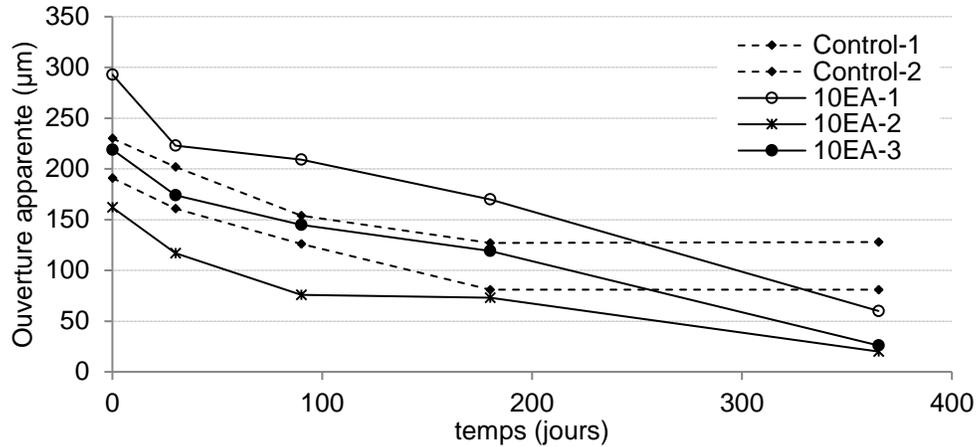


Figure 9. Évolution avec le temps des ouvertures apparentes du mortier 10EA

Dans l'ensemble, le mortier 10EA a montré un fort potentiel d'autocicatrisation. Les taux de cicatrisation étaient de 80% à 88% pour des fissures ayant des ouvertures initiales de 162 µm à 293 µm.

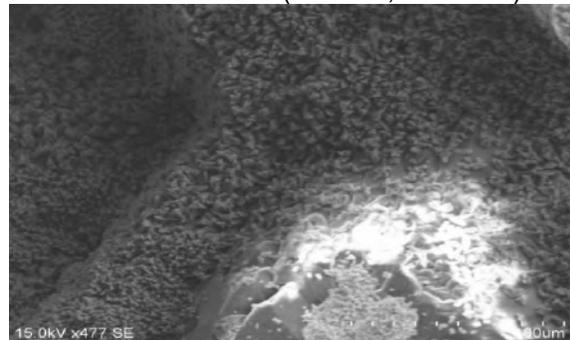
4.4 Microstructure des produits de cicatrisation

La Figure 10 montre des exemples de la microstructure des surfaces des fissures cicatrisées. Les cristaux de calcite sont le produit de cicatrisation le plus répandu dans tous les mortiers étudiés. Ils forment habituellement une couche compacte sur la plupart des surfaces internes des fissures. L'épaisseur et la densité de cette couche dépendent du potentiel d'autocicatrisation qu'a montré le mortier concerné. Les photos de la Figure 10-a montrent l'aspect de la microstructure des produits de cicatrisation dans les mortiers qui ont montré un fort potentiel d'autocicatrisation, en particulier des mortiers 10EA et 30KFA17. Les couches de cristaux de calcite sont assez denses pour couvrir et masquer les formes initiales des reliefs des plans de fissuration (sable ...). Les formations en relief de calcite sont visibles indiquant une épaisseur substantielle de la couche de cicatrisation. Les photos de la Figure 10-b montrent la microstructure des produits de cicatrisation des mortiers à faible capacité d'autocicatrisation (10KFA9 et 10KFA17). Les couches de cristaux de calcite ne sont pas assez épaisses pour couvrir complètement les grains de sable sur les parois intérieures des fissures.

a) Microstructure des surfaces des fissures cicatrisées des mortiers à fort potentiel d'autocicatrisation (10EA; 30KFA17)



b) Microstructure des surfaces des fissures cicatrisées des mortiers à faible potentiel d'autocicatrisation (10KFA9; 10KFA17)



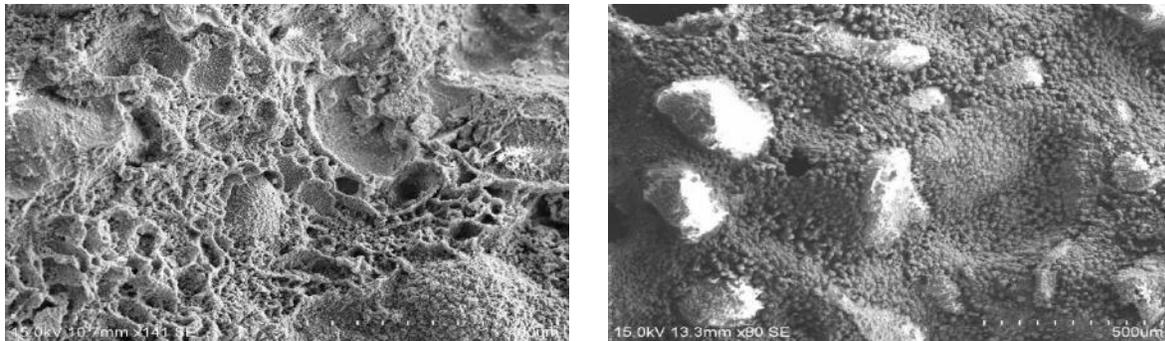


Figure 10. Cristaux de carbonate de calcium observés au MEB sur les surfaces internes de fissures cicatrisées

En allant des extrémités des plans des fissures vers leurs centres, des aiguilles d'ettringite commencent à apparaître. Elles sont plus abondantes dans les centres. Les images de la Figure 11 montrent des exemples d'ettringite observé au MEB sur les parois des fissures cicatrisées des mortiers étudiés.

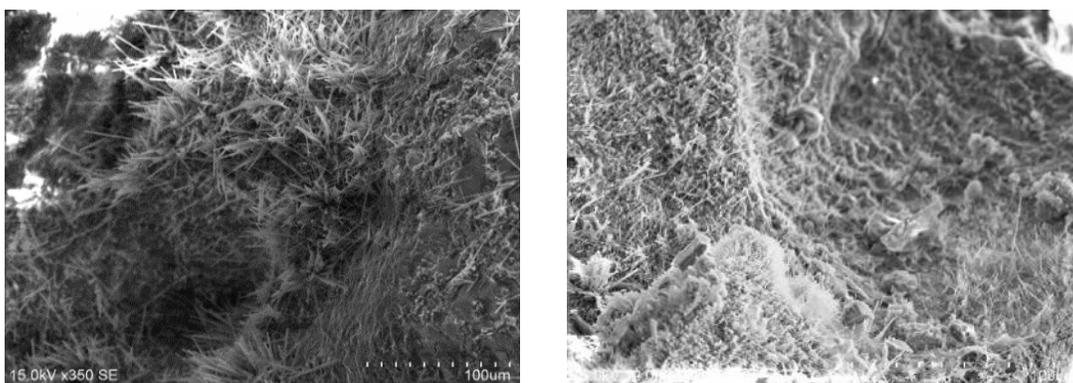


Figure 11. Ettringite observé au MEB dans des fissures cicatrisées

4.5 Teneur en Portlandite

Le Tableau 3 présente la teneur en Portlandite des mortiers Control, 10EA, 10KFA9, 10KFA17 et 30KFA17 à l'âge de 28 jours.

Tableau 3. Teneur en Portlandite à 28 jours

Mortier	Teneur en Portlandite (mg/g _{mortier})
Control	43,1
10KFA9	41,4
10KFA17	42,5
30KFA17	51,0
10EA	61,5

Le mortier 10EA, dans lequel 10% de ciment a été remplacé par l'agent expansif (EA), contient 43% plus de Portlandite que le mortier de référence (Control) à l'âge de 28 jours. Cette augmentation du contenu en Portlandite est le résultat de l'hydratation de la chaux libre contenue dans l'agent expansif. En effet, l'agent expansif (EA) contient 58% de CaO libre. Dans le mortier 10KFA9, 10% de ciment ont été remplacés par

des cendres volantes de biomasse KFA9. Cette cendre volante contient seulement 9% de chaux libre. Le remplacement du ciment par ces KFA9 a induit une diminution de 4% de la teneur en Portlandite dans le mortier à l'âge de 28 jours par rapport au mortier de référence (Control). Le mortier 10KFA17 contient 10% de cendres volantes KFA17 ayant une teneur en chaux libre de 17%. À l'âge de 28 jours, sa teneur en Portlandite est comparable à celle du mortier de référence (Control). En revanche, le remplacement de 30% du ciment par la même cendre volante dans le mortier 30KFA17 augmente la teneur en Portlandite de 18% par rapport au mortier de référence (Control). La teneur en chaux libre du réactif ajouté au mortier a un impact direct sur sa teneur en Portlandite à 28 jours. La chaux libre (CaO) des inclusions introduites dans le mortier réagit avec l'eau de mélange et donne de la chaux hydratée (Ca(OH)₂). La Portlandite formée ne sera pas consommée par une activité pozzolanique pendant les 28 jours de stockage dans la chambre humide.

5. EFFET DE LA TENEUR EN PORTLANDITE SUR LE POTENTIEL D'AUTOCICATRISATION

L'observation au MEB de la microstructure des produits de cicatrisation des différents mortiers a montré qu'il s'agit principalement une couche de cristaux de carbonate de calcium avec une présence moins importante d'ettringite. Le principal mécanisme responsable de la cicatrisation des fissures de ces mortiers est la carbonatation. La Figure 12 présente les taux finaux de cicatrisation des différents mortiers étudiés

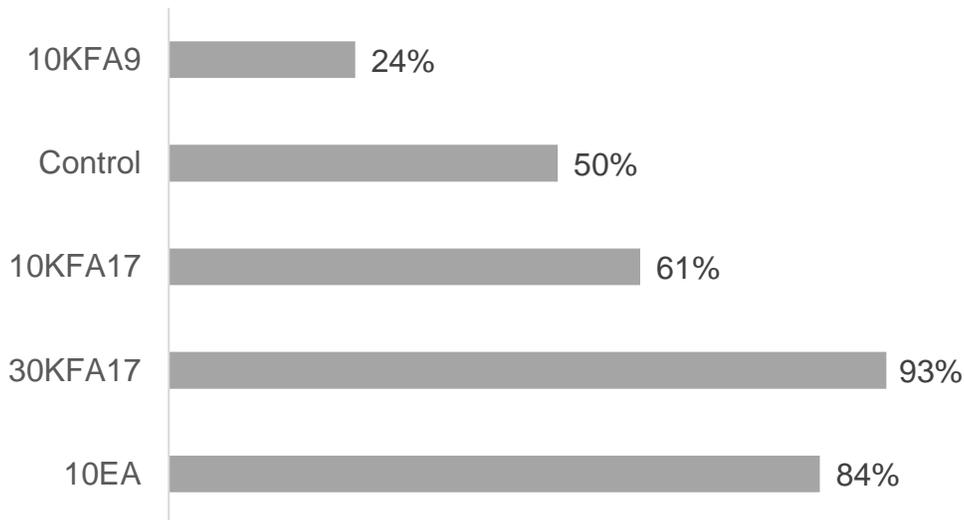


Figure 12. Taux de cicatrisation après 12 mois de conservation

Le mortier 10KFA9, avec la plus faible teneur en Portlandite (41,4 mg / g_{mortier}), a montré un faible potentiel d'autocicatrisation après 12 mois de stockage dans une chambre humide. Le taux de cicatrisation moyen final est de 24%. Le mortier de référence, ayant une teneur un peu plus élevée en Portlandite (43,1 mg / g_{mortier}), a montré un potentiel d'autocicatrisation plus élevé et un taux de cicatrisation moyen final de 50%. Le mortier 10KFA17, avec une teneur en Portlandite légèrement inférieure au mortier de référence (42,5 mg / g_{mortier}), a présenté des taux de cicatrisation plus élevés pour les mêmes conditions de stockage. Le taux final moyen de cicatrisation est de 61%. Mais l'épaisseur moyenne des produits de cicatrisation apparente est approximativement la même (106 µm). Le mortier 30KFA17, ayant une teneur en Portlandite à 28 jours de 51 mg / g_{mortier}, a montré une très grande capacité d'autocicatrisation. Les taux de cicatrisation sont supérieurs à 90% pour des fissures ayant des ouvertures apparentes initiales de 127 µm et 182 µm.

Les taux de cicatrisation de mortier 10EA sont supérieurs à 80% pour des fissures avec des ouvertures apparentes initiales de 162 µm et 219 µm et 293 µm. La teneur en Portlandite de ce mortier au moment de la fissuration est de 62 mg / g_{mortier}. Une relation semble exister entre la teneur en Portlandite au moment

de la fissuration et le potentiel d'autocicatrisation. Pour visualiser davantage cette relation, l'épaisseur apparente moyenne de la cicatrisation des mortiers est présentée, dans la Figure 13, en fonction de leur teneur en Portlandite au moment de la fissuration (âge de 28 jours).

Le graphique montre une corrélation entre l'épaisseur apparente des produits de cicatrisation et la teneur en Portlandite au moment de la fissuration. Pour chaque âge d'autocicatrisation (1, 3, 6 et 12 mois), une courbe de tendance de la relation entre l'épaisseur apparente des produits de cicatrisation et le contenu de Portlandite est établie. Les courbes obtenues montrent que, entre 0 et 6 mois, l'épaisseur apparente des produits de cicatrisation n'est pas influencée par la teneur en Portlandite. La tendance de la courbe à 12 mois est différente des autres montrant que l'effet de la teneur en Portlandite augmente avec le temps. Ceci implique que l'effet de la teneur en Portlandite sur le potentiel d'autocicatrisation apparaît en particulier entre 6 et 12 mois.

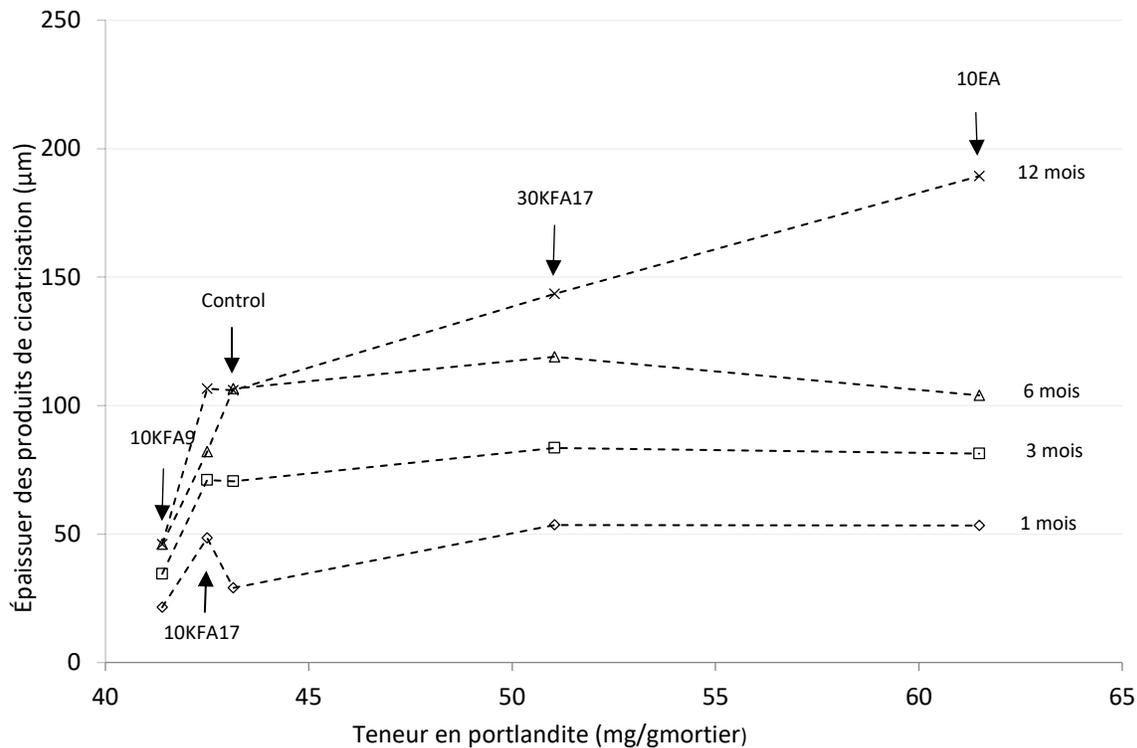


Figure 13. Épaisseur des produits de cicatrisation en fonction de la teneur en Portlandite après 1, 3, 6 et 12 mois d'autocicatrisation.

6. CONCLUSION

Le but de ce projet de recherche est d'étudier l'effet d'un apport supplémentaire en Portlandite sur le potentiel d'autocicatrisation des mortiers. Des ajouts avec différentes teneurs en chaux libre sont introduits. Les ajouts proposés sont un agent expansif interne avec une teneur élevée en chaux libre (58% de CaO libre) et deux cendres volantes à biomasse ayant des teneurs différentes en chaux libre de 9% et 17%. Les dosages en ajouts ont été choisis pour obtenir des mortiers ayant diverses teneurs en Portlandite. Les conclusions obtenues des résultats de cette étude sont les suivantes :

- La teneur en chaux libre du réactif ajouté au mortier influence directement sa teneur en Portlandite à l'âge de 28 jours. En fait, l'absence de réaction pozzolanique (qui consomme le Portlandite) et l'hydratation de la chaux libre additionnelle augmentent la teneur en chaux hydratée de mortiers.

- Il existe une corrélation entre l'épaisseur apparente des produits de cicatrisation et la teneur en Portlandite au moment de la fissuration.

- L'épaisseur apparente des produits de cicatrisation est beaucoup plus importante pour les mortiers ayant des teneurs élevées Portlandite, au moment de la fissuration.

- Un mortier ayant une teneur en Portlandite faible de 41 mg / g_{mortier} (mortier 10KFAB9) a une épaisseur apparente moyenne des produits de cicatrisation de 54 µm après 12 mois de conservation.

- Un mortier ayant une forte teneur en Portlandite de 62 mg / g_{mortier} (mortier 10EA) a une épaisseur apparente moyenne des produits de cicatrisation de 192 µm après 12 mois de conservation.

- L'effet de la teneur en Portlandite sur le potentiel d'autocicatrisation devient de plus en plus important avec le temps de stockage. En effet, les mortiers ayant une teneur élevée en Portlandite au moment de la fissuration montrent une activité d'autocicatrisation importante entre 6 et 12 mois de stockage

- L'observation au MEB des fissures cicatrisées des mortiers a montré l'existence d'une couche de calcite qui recouvre toute la surface intérieure des fissures. La densité et l'homogénéité de la couche varient en fonction de l'importance de l'épaisseur apparente d'autocicatrisation.

La principale contribution de cette étude est de démontrer que la carbonatation est en effet le mécanisme d'autocicatrisation naturel le plus important. L'augmentation de la teneur en Portlandite de la matrice cimentaire peut activer ce mécanisme et, par conséquent, obtenir un matériau cimentaire avec un fort potentiel d'autocicatrisation (un taux de cicatrisation apparente de 83% pour une grande fissure de 293 µm)

7. RÉFÉRENCES

Edvardsen, C. (1999). Water permeability and autogenous healing of cracks in concrete. *ACI Materials Journal*, volume 96, numéro 4, p. 448-454.

Gagne, R. et Argouges, M. (2012). A study of the natural self-healing of mortars using air-flow measurements. *Materials and Structures*, volume 45, numéro 11, p. 1625-38.

Jacobsen, S. et Sellevold, E. J. (1996). Self healing of high strength concrete after deterioration by freeze/thaw. *Cement and Concrete Research*, volume 26, numéro 1, p. 55-62.

JAVELLANA M.P, JAWED I. (1982). Extraction of Free Lime in Portland cement and Clinker by Ethylene Glycol. *Cement and Concrete Research*, vol.12, pp. 399-403.

Ranaivomanana, H. (2010). *Transferts dans les milieux poreux réactifs non saturés : Application à la cicatrisation de fissure dans les matériaux cimentaires par carbonatation* Université de Toulouse, Toulouse, France,

Sahmaran, M., Keskin, S. B., Ozerkan, G. et Yaman, I. O. (2008). Self-healing of mechanically-loaded self consolidating concretes with high volumes of fly ash. *Cement and Concrete Composites*, volume 30, numéro 10, p. 872-879.

Termkhajornkit, P., Nawa, T., Yamashiro, Y. et Saito, T. (2009). Self-healing ability of fly ash-cement systems. *Cement and Concrete Composites*, volume 31, numéro 3, p. 195-203.

Thiery, M. (2005). *Modélisation de la carbonatation atmosphérique des matériaux cimentaires. Prise en compte des effets cinétiques et des modifications microstructurales et hydriques*. LCPC, Paris, France.

MERCI À NOS PRÉCIEUX COMMANDITAIRES



UNIVERSITÉ
LAVAL

Faculté des sciences et de génie
Département de génie civil
et de génie des eaux



Centre de recherche sur les
infrastructures en béton

Québec 



LA référence



Association
Canadienne
du Ciment



QUEBEC &
E. ONTARIO



www.bm-underground.com



Ciment Québec



EUCLID CANADA



INTERNATIONAL
CONCRETE REPAIR
INSTITUTE

SECTION
du Québec



LAFARGE