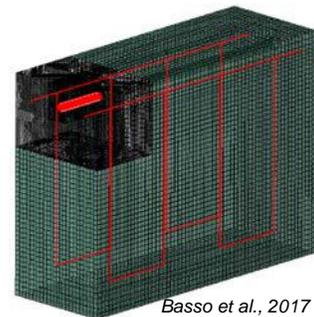
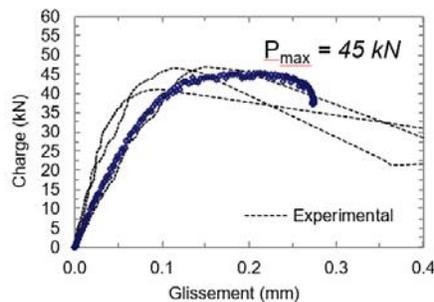


Actes de la 18^e édition des Journées Scientifiques

(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

RÉCENTS DÉVELOPPEMENTS DANS LA RECHERCHE ET LES SPÉCIFICATIONS SUR LES GRANULATS À BÉTON INCORPORANT DES SULFURES DE FER

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

RÉSUMÉ : Au cours des deux dernières décennies, les propriétaires de nombreuses maisons unifamiliales et édifices commerciaux de la région de Trois-Rivières (Québec) ont fait face à d'importants problèmes de durabilité de leurs fondations et dalles de béton. La présence de pyrite et de pyrrhotite a été observée dans le granulats ayant servi à la fabrication des bétons montrant des problèmes prématurés de détérioration. Dans certains cas, la dégradation est telle que des interventions à court terme sont requises. Dans tous les cas, la pierre utilisée contenait de la pyrite et de la pyrrhotite en différentes proportions et l'oxydation de la pyrrhotite et les problèmes de sulfatation associés sont à la source des dégradations observées. Or, la présence de sulfures de fer dans les granulats est assez répandue, il est donc essentiel d'étudier les mécanismes de réaction et les paramètres influant la réaction. Considérant l'ampleur de la problématique, plusieurs intervenants du milieu se sont regroupés afin de financer un programme de recherche et de faire la lumière sur ce phénomène. Le projet visait à étudier la détérioration du béton en présence de sulfures de fer afin de développer une base scientifique permettant de documenter le comportement et les caractéristiques de ces matériaux. Le projet visait également à développer un programme d'essais de performance capable de détecter les granulats problématiques et, ultimement, d'élaborer des recommandations pouvant servir de référence pour les divers intervenants de l'industrie.

1. INTRODUCTION

Les granulats fins et grossiers représentent typiquement 60 à 75% du béton; il n'est donc pas surprenant que leur composition et propriétés physico-mécaniques aient un impact majeur sur le comportement mécanique et en durabilité de ce matériau. C'est par exemple le cas de certains granulats dont les caractéristiques intrinsèques (e.g. dimension et distribution des pores) les rendent vulnérables aux cycles de gel-dégel, pouvant ainsi engendrer de l'éclatement de surface (*popouts*) ou de la fissuration (*D-cracking*) sur les éléments en béton qui les contiennent. De nombreux types de roches contiennent également des phases siliceuses instables dans les conditions de pH élevé de la solution interstitielle du béton, engendrant ainsi des problèmes de gonflement, de déformation et de fissuration prématurés d'éléments structuraux par le phénomène de la *réaction alcalis-silice (RAS)*.

Les granulats à béton peuvent également contenir une certaine quantité de sulfures de fer, principalement la pyrite et la pyrrhotite. Ces derniers sont des minéraux communs et répandus dans les roches. La pyrite, dont la formule chimique est FeS_2 , se présente normalement sous forme de grandes masses ou veines d'origine hydrothermale. Elle peut être bien cristallisée sous forme de cubes, d'octaèdres et de

dodécaèdres, mais elle se présente souvent sous forme framboïdale dans les roches sédimentaires telles que le shale et le calcaire. La pyrrhotite est pour sa part un minéral de composition non-stœchiométrique avec une formule générale $Fe_{1-x}S$, avec x variant de 0 à 0,125 (De Villiers et Liles, 2010). Présente surtout associée à la pentlandite ($(Fe,Ni)_9S_8$) dans les roches ignées basiques, en veines dans différents types de roches et dans les roches métamorphiques, la pyrrhotite est aussi associée à la pyrite, la marcasite, la magnétite et la chalcopryrite (Deer et al., 1992; Belzile et al., 2004). Ces sulfures sont instables en présence d'oxygène et d'humidité et peuvent causer les phénomènes d'oxydation et de sulfatation déjà reconnues comme problématiques dans plusieurs environnements. En fait, plusieurs facteurs peuvent influencer l'oxydation des sulfures de fer ; parmi ceux-ci, notons le pH, la température, la teneur en oxygène dissous, le degré de saturation en eau, le degré d'exposition, la surface spécifique des sulfures, la présence de bactéries, et autres (Duchesne et al., 2010). Au cours des dernières années, les propriétaires de nombreuses maisons unifamiliales, immeubles d'appartements et édifices commerciaux de la région de Trois-Rivières (Québec, Canada) ont fait face à de sérieux problèmes de durabilité de leurs fondations et dalles de béton. Dans tous les cas, le granulat utilisé pour la fabrication du béton, un gabbro anorthositique provenant d'un massif rocheux de la région de Saint-Boniface, contenait des sulfures de fer en différentes proportions, notamment de la pyrite et de la pyrrhotite. Le granulat est composé majoritairement de feldspath plagioclase calcique avec des quantités moindre de biotite et de pyroxène. La roche est minéralisée par endroit avec des teneurs en pyrite et en pyrrhotite variable d'un grain à l'autre. Des teneurs en soufre ont été mesurées sur plusieurs grains de granulat et la fourchette obtenue s'étend de 0,45 à 2,15% S (Duchesne et al., 2010). Dans bien des cas, la fissuration et les problèmes de déformations ont fait leur apparition sur les structures atteintes moins de cinq ans après leur construction (Figure 1). Plus récemment, des centaines de maisons situées dans une région de l'état du Connecticut (États-Unis) ont développé d'importants signes d'endommagement entre 10 et 20 ans suivant leur construction (Willie and Zhong, 2016). Les problèmes ont été liés au phénomène d'oxydation de la pyrrhotite présente au sein du granulat provenant d'une carrière de la région de Willington, Connecticut. La géologie dans la région de cette carrière est caractérisée par la présence de roches métamorphiques appartenant principalement à deux ou trois formations comprenant des schistes et gneiss, de même qu'une diorite quartzifère foliée.

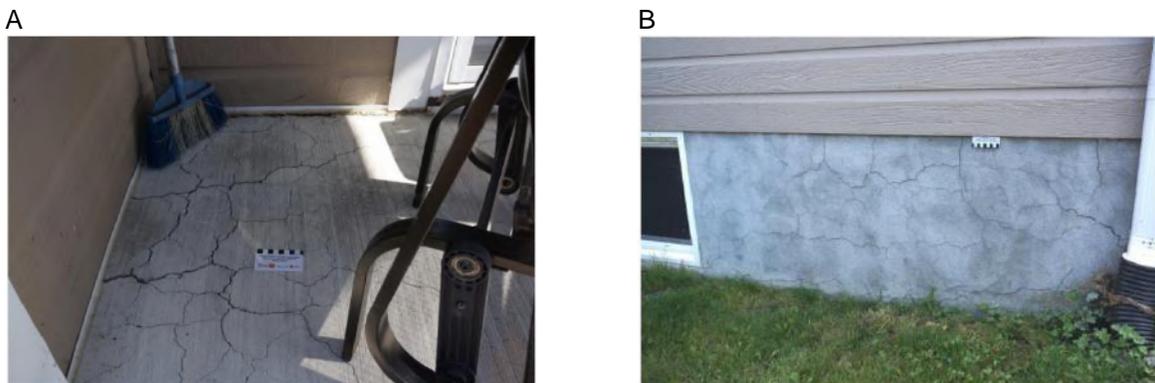


Figure 1. Endommagement d'éléments de béton d'une résidence familiale, région de Trois-Rivières.

2. PROBLÉMATIQUE ET CONTEXTE DE L'ÉTUDE

On retrouve à l'Annexe P de la norme CSA A23.2-2014 une liste d'études de cas discutant des effets dommageables dans le béton de granulats renfermant des sulfures de fer. Le plus ancien des rapports est suédois et traite des effets dommageables de la pyrrhotite et de la pyrite (Hagerman et Roosaar, 1955); on y discute également de cas observés en Norvège, au Royaume-Uni, au Canada, en Afrique du sud, en Australie, en Espagne et en Suisse. Bien que cette problématique soit connue depuis plusieurs décennies, peu d'outils sont disponibles aux ingénieurs afin d'évaluer la performance des granulats face au phénomène d'oxydation des sulfures dans le béton. Midgley (1958), et plus récemment Ramos et al. (2016), ont proposé des essais pour détecter les traces d'oxydation pouvant être engendrées par des granulats incorporant des sulfures de fer; toutefois, ces essais demeurent largement qualitatifs.

Un projet de recherche a été réalisé entre 2010 et 2014 dans le cadre d'un partenariat entre des chercheurs universitaires et des organismes des secteurs privé et public (Duchesne et al., 2014). Ainsi, des blocs métriques prélevés au sein de fondations résidentielles ont été disposés sur un site d'exposition extérieure situé à Trois-Rivières Nord. Leur changement dimensionnel et le développement de fissuration ont été suivis de façon régulière (Francoeur, 2016). Des carottes prélevées au sein de ces blocs, de même que dans plusieurs autres fondations résidentielles, ont été soumises à un examen pétrographique détaillé. En parallèle, des granulats obtenus de sources canadienne et européenne ont été soumis à un vaste programme expérimental en laboratoire. Une analyse chimique et minéralogique détaillée de ces matériaux granulaires a d'abord été réalisée, et ces derniers ont été utilisés dans le développement de plusieurs méthodes expérimentales visant à déterminer leur comportement face à l'oxydation des sulfures de fer (Rodrigues et al., 2012, 2015, 2016a,b). Cet article résume les principaux résultats de ce projet de recherche et les efforts actuellement en cours, entre autres au sein du comité CSA A23.1/A23.2, afin de transférer les résultats de la recherche vers des normes permettant le contrôle de la qualité des granulats à béton incorporant des sulfures de fer.

3. RÉACTION ET MÉCANISME D'ENDOMMAGEMENT DU BÉTON

La littérature scientifique fait état de plusieurs cas de détérioration du béton due à l'oxydation de sulfures présents dans des roches poreuses et mécaniquement faibles (Bérard et al., 1975; Chinchon et al., 1995, Casanova et al., 1996 ; Ayora et al., 1998). Les cas reconnus plus récemment ont démontré que ce phénomène peut également affecter des bétons incorporant des roches dures et plutôt massives, telles que gabbro anorthositique (région de Trois-Rivières) ou des gneiss (Connecticut).

L'information disponible dans la littérature, de même que les observations effectuées sur des carottes prélevées dans de nombreux éléments de béton détérioré dans la région de Trois-Rivières, ont permis de démontrer que l'altération des sulfures de fer (principalement pyrrhotite) se produit en présence d'oxygène et d'humidité, générant ainsi de l'acide sulfurique en plus de diverses phases minérales secondaires (e.g. Rodrigues et al., 2012; Annexe P – CSA A23.1-2014). La dégradation du béton est donc engendrée à la fois par l'oxydation des sulfures de fer et la sulfatation de la pâte de ciment, ces deux réactions créant des minéraux secondaires pouvant causer un gonflement, soit les «rouilles» de toutes sortes [oxyhydroxydes ferriques tels que goethite, limonite et ferrihydrite] (Figure 2A), et les sulfates (gypse et ettringite) (Figure 2B) (Tagnit-Hamou et al., 2005, Rodrigues et al., 2012). Si des carbonates sont également présents dans le béton (e.g. dans le granulat lui-même, fillers ou ciments de calcaire), une réaction entre les sulfates, les silicates et les carbonates pour former de la thaumasite, comme ce fut le cas à Trois-Rivières (Rodrigues et al., 2012). Ces réactions peuvent entraîner l'expansion et la fissuration très rapide de l'élément affecté (Figure 3). Casanova et al., (1996) considèrent que la sulfatation est de loin plus expansive. Par exemple, lors de la formation du gypse, le volume du produit précipité représente un peu plus du double de celui des solides de départ.

4. EXIGENCES NORMATIVES ACTUELLES (adapté de l'Annexe P, CSA A23.1-2014)

La norme CSA A23.1-2014 (article 4.2.3.6.2) met en garde les utilisateurs contre le risque d'utiliser des granulats à béton contenant des sulfures de fer :

«Les granulats qui produisent une expansion excessive du béton à cause d'une réaction autre que la réactivité alcaline, ne doivent pas être utilisés dans le béton, à moins que des mesures préventives aient été prises à la satisfaction du maître d'ouvrage.»

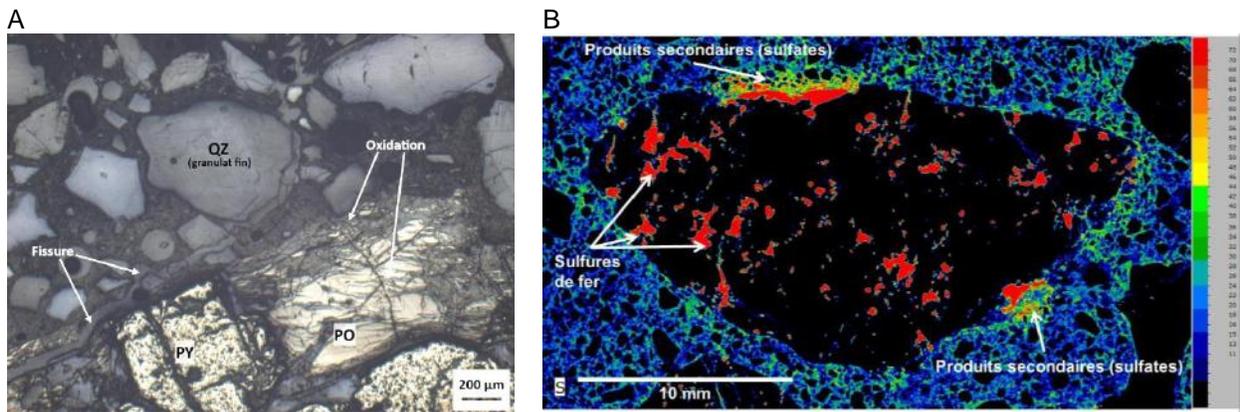
Note : Bien que rares, des expansions importantes peuvent se produire pour des raisons autres que la réactivité alcalis-granulat. Ces expansions pourraient être attribuables aux facteurs suivants :

a) La présence de sulfures, tels que la pyrite, la pyrrhotite et la marcasite, dans le granulat qui pourraient s'oxyder et s'hydrater, avec prise de volume ou libération de sulfates suivie d'une attaque sulfatique de la pâte de ciment, ou les deux.»

La norme française NF P18-301 (1983) limitait la teneur totale en soufre des granulats à 0,4% sous forme de SO_3 (0,16 % sous forme de S). Ce seuil a d'abord été relevé une première fois dans la norme NF P18-541 (1994) à 0,4% sous forme de S (i.e. 1% as SO_3), puis une seconde fois dans le contexte de la standardisation européenne. Ainsi, la NF EN 12 620 (2003) spécifiait que la teneur totale en soufre (S) des granulats et des fillers, s'il en fallait, ne doit pas dépasser les limites suivantes :

- a) 2 % de S en masse pour le laitier de haut-fourneau refroidi à l'air ; et
- b) 1 % de S en masse pour les granulats autres que le laitier de haut-fourneau refroidi à l'air.

Note : Des précautions particulières s'imposent quand la pyrrhotite, une forme instable du sulfure de fer FeS , est présente dans le granulat. Si la présence de ce minéral est prouvée, la teneur totale en soufre (sous forme de S) doit être de 0,1 %.



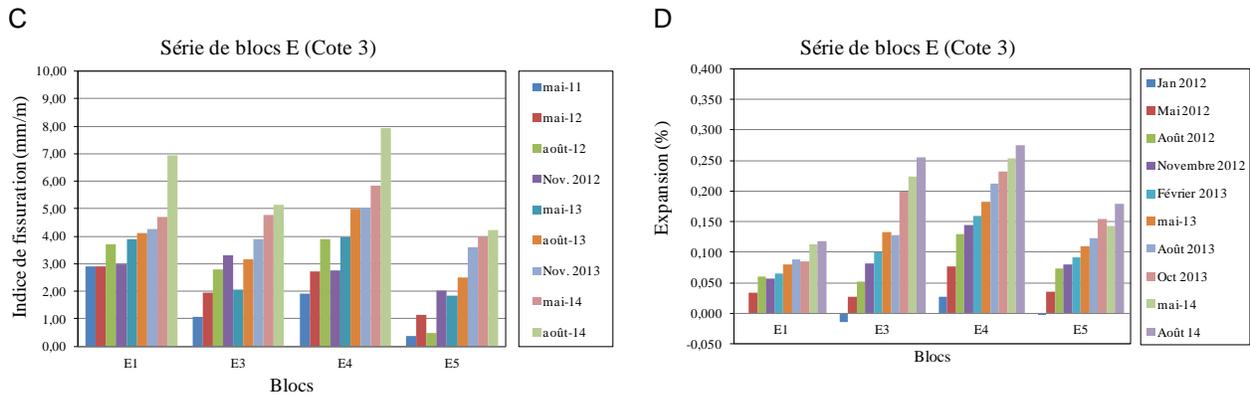


Figure 3. A. Prélèvement de blocs métriques dans une fondation résidentielle (Trois-Rivières). B. Disposition sur un site d'exposition extérieur situé à Trois-Rivières Nord. C. Résultats de mesures d'indice de fissuration (Blocs série E) selon la méthode proposée par LCPC (1997) et indiquant une augmentation significative de l'intensité de la fissuration à la surface de 4 blocs métrique (provenant d'une même fondation résidentielle – série E) entre mai 2011 et août 2014. D. Résultats de mesures d'expansion effectuées sur les blocs de la série E, entre janvier 2012 et août 2014. (Francoeur, 2016).

5. NOUVEAU PROTOCOLE POUR LE CONTRÔLE DE LA QUALITÉ DES GRANULATS INCORPORANT DES SULFURES DE FER

Suite aux travaux réalisés dans le cadre du programme de recherche mentionné précédemment, Rodrigues et al., (2016b) ont proposé un protocole permettant d'évaluer en laboratoire, et ce en différentes étapes, le potentiel de réaction/d'expansion nuisible de granulats incorporant des sulfures de fer (Figure 4). Il implique la détermination de la teneur en soufre total (S_T) (**Étape 1**), du potentiel d'oxydation (essai de consommation d'oxygène - **Étape 2**), et du potentiel expansif (essai sur mortier - **Étape 3**) du matériau granulaire (Rodrigues et al., 2016b). La rencontre ou non de valeurs limite proposées pour ces essais engendre l'acceptation ou le rejet du matériau granulaire à l'essai pour utilisation dans le béton de ciment.

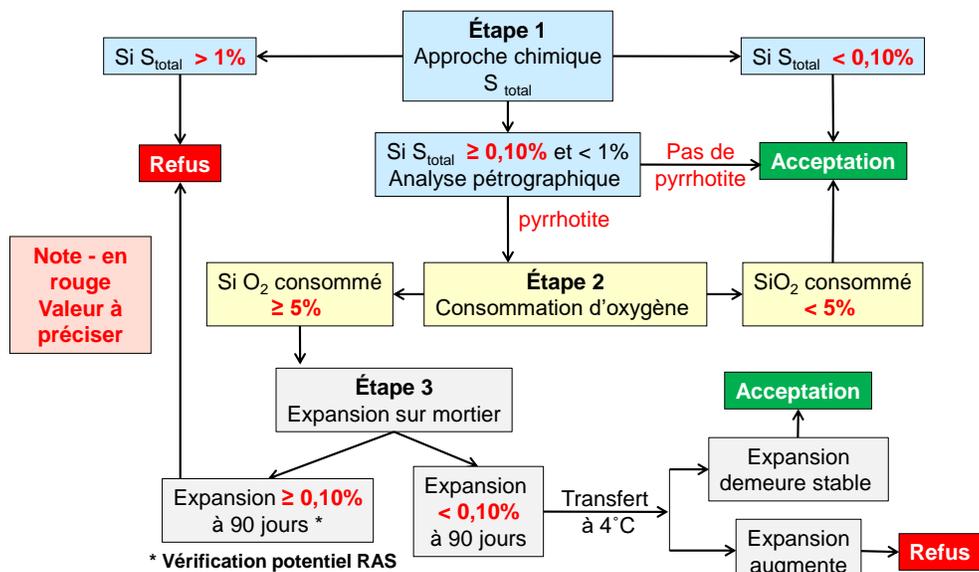


Figure 4. Protocole pour l'évaluation du potentiel nuisible des granulats à béton incorporant des sulfures de fer (Rodrigues et al., 2016b).

5.1 Détermination de la performance en service

Le potentiel nuisible de granulats produits dans une carrière, face au phénomène d'oxydation des sulfures de fer, pourra possiblement être déterminé par l'inspection de structures en service incorporant le matériau granulaire à l'étude. Les résultats de l'inspection visuelle de structures sélectionnées (de façon à y reconnaître ou non la présence d'indices d'endommagement associables à ce phénomène) seront alors complétés par une cartographie détaillée de la source de granulats, en particulier concernant la variabilité de la nature/composition des lithologies (e.g. teneur en pyrrhotite) qui y sont exploitées, et par l'examen pétrographique de carottes prélevées au sein d'éléments structuraux exposés à des conditions favorisant l'oxydation des sulfures de fer présents dans les granulats du béton. Une décision définitive quant au caractère nuisible ou non du granulat étudié sera ainsi fonction de la capacité de lier (ou non) les indices visuels d'endommagement au niveau de la structure étudiée aux caractéristiques compositionnelles du granulat (e.g. teneur/nature des sulfures de fer) et à la présence (ou non) d'indices pétrographiques de détérioration sur les échantillons de béton (oxydation du granulat et sulfatation du béton).

5.2 Investigations en laboratoire : Étape 1 - détermination de la teneur en soufre total

Lors de cette première étape du programme expérimental réalisé en laboratoire, les granulats sont analysés chimiquement afin d'en connaître la teneur en soufre total (S_T). Un échantillon « représentatif » de 0,3 à 1g du matériau granulaire à l'étude, dont les particules sont inférieures à 80 μ m, est analysé avec un analyseur carbone/soufre (Figure 5A), grâce à une méthode d'absorption infrarouge. Un accélérateur constitué de tungstène et de fer est ajouté à l'échantillon pour faciliter sa combustion. La teneur en soufre est mesurée à partir du SO_2 dans le gaz de combustion. La clé du succès de cet essai réside dans le mode de préparation de l'échantillon. Rodrigues et al. (2016a) ont proposé un mode de préparation combinant une série d'étapes de quartage, de concassage/ broyage/pulvérisation et de tamisage permettant de produire un échantillon représentatif du matériau granulaire original (Figure 5B).

A



B

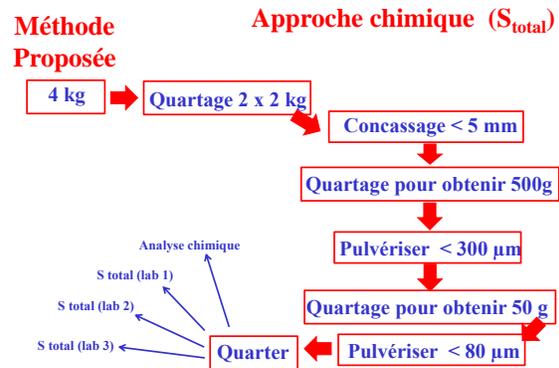


Figure 5: A. Analyseur carbone/soufre Eltra CS800 utilisé à l'Université Laval. B. Protocole de préparation des échantillons pour la mesure du soufre total (S_T) des granulats (Rodrigues et al., 2016a,b).

Selon les recommandations de la norme européenne NF EN 12 620 (2003), les granulats dont la teneur en soufre total (S_T) est supérieure à 1% ne devraient pas être utilisés dans le béton. Les granulats qui présentent une teneur en $1\% < S_T \leq 0,10\%$ doivent être analysés à l'étape 2 afin de déterminer si le soufre est présent sous la forme de sulfures susceptibles à l'oxydation (Figure 4). Dès que la teneur en soufre total est $\geq 0,10\%$, une analyse pétrographique en lumière réfléchie est recommandée afin d'identifier les phases sulfurées. Les granulats dont la teneur en S_T est inférieure à 0,10% ne présenteraient pas de risque d'oxydation nuisible. Il est à noter que la valeur seuil de 0,10% est provisoire et n'a pas pu être confirmée compte-tenu du nombre limité de granulats étudiés dans le cadre du programme de recherche. Cette valeur a été jusqu'ici adoptée de façon à accepter les granulats selon les limites établies par la norme européenne et les recommandations décrites à l'annexe P de la norme CSA

A23.1-2014. Cette limite ne pourra être confirmée que suite à une analyse globale de la situation dans un contexte québécois et canadien.

La précision de cette méthode a été évaluée sur un groupe de 43 échantillons représentant une variété de lithologies/types de roches rencontrées sur le territoire québécois (granite, diorite, syénite, gabbro, andésite, basalte, phonolite, tuf, gneiss, grès, calcaire et dolomie) (Rodrigues et al., 2016b). Les échantillons ont été préparés dans le lab.1 en utilisant le protocole décrit à la Figure 5B. Les échantillons ainsi produits ont ensuite été fournis à deux autres laboratoires également équipés d'analyseurs carbone/soufre (Leco/Eltra). Les résultats ont montré une variabilité fort acceptable avec un coefficient de variation (CV) généralement inférieur à 10% dans le cas des granulats ayant une teneur en $S_T > 0,05\%$. Des valeurs de CV plus élevées ont été obtenues dans le cas de granulats ayant une teneur en $S_T < 0,05\%$, ce qui est normal compte-tenu que ces valeurs sont très faibles et également près de la limite de détection des appareils. Il est intéressant de noter qu'environ 50% (21/43) des échantillons testés montraient une teneur en $S_T \geq 0,10\%$, confirmant qu'une proportion significative de types de roches contient en effet une quantité non négligeable de sulfures de fer (avec une teneur en $S_T \geq 0,10\%$); ainsi, ces matériaux granulaires nécessiteraient des analyses supplémentaires afin d'identifier la présence (ou non) de pyrrhotite. Dans le cas des échantillons analysés, seuls trois d'entre eux (i.e. 3/21) contenaient de la pyrrhotite (Rodrigues et al., 2016b).

5.3 Investigations en laboratoire : Étape 2 - détermination de consommation d'oxygène

Le soufre contenu dans les granulats peut provenir de différents minéraux. La valeur de S_T ne permet pas de savoir à quel(s) minéral (aux) il est associé; il est connu que la pyrrhotite présente une cinétique d'oxydation plus rapide que les autres sulfures de fer. De plus, même si la pyrrhotite peut être identifiée lors d'une analyse microscopique en lumière réfléchie, il est difficile d'obtenir une valeur quantitative de sa teneur dans l'échantillon de matériau granulaire. Pour compliquer l'analyse, la pyrrhotite n'est pas un minéral à composition chimique fixe. En fait, la pyrrhotite est un minéral qui peut accommoder différents cations et ce, en différentes proportions dans sa structure atomique. Le potentiel d'oxydation de la pyrrhotite sera fonction de sa composition chimique. De même, la pyrrhotite peut cristalliser sous différents systèmes cristallins, et peut présenter des surfaces spécifiques différentes, ce qui complexifie l'étude du potentiel d'oxydation. Bien que la teneur en pyrrhotite soit un bon indicateur des dommages générés pour des granulats provenant de la même source (cas des dégradations observés dans la région de Trois-Rivières avec des granulats provenant de la même source), il ne serait pas approprié d'étendre directement les valeurs observées à partir d'une source à d'autres lithologies. C'est dans cette optique que l'essai de la consommation d'oxygène a été développé.

L'oxydation des sulfures se fait en présence d'oxygène et d'humidité. Lorsque l'oxygène est consommé, sa concentration diminue dans un volume clos. La technique est basée sur la mesure de la diminution de la concentration en oxygène (O_2) en fonction du temps dans un cylindre étanche de volume connu. Plusieurs facteurs font varier cette teneur (quantité de matériaux, granulométrie, température, humidité relative,...) et les paramètres d'essai doivent être fixés précisément. Suite à une série d'essais réalisés sur une sélection de granulats incorporant ou non des sulfures de fer, des paramètres ont été optimisés pour évaluer le potentiel d'oxydation des granulats, i.e. une taille de particules inférieure à 150 μm , matériau granulaire à 40% de saturation, un rapport de 10 cm d'épaisseur de granulat (compacté) par 10 cm de dégagement, et trois heures d'essai à 22°C (Figure 6A). Les essais réalisés sur les huit matériaux granulaires sélectionnés ont suggéré une coupure autour de 5% de O_2 consommé, ce qui veut dire que les granulats consommant plus de 5% du O_2 présent dans l'enceinte présentent un potentiel d'oxydation (Figure 6B). Des essais supplémentaires afin d'optimiser les conditions d'essai et, ultimement, d'en vérifier la variabilité inter-laboratoire, demeurent nécessaires. De même, les essais devront se poursuivre sur un nombre important de sources de granulat afin de préciser la valeur de coupure proposée.

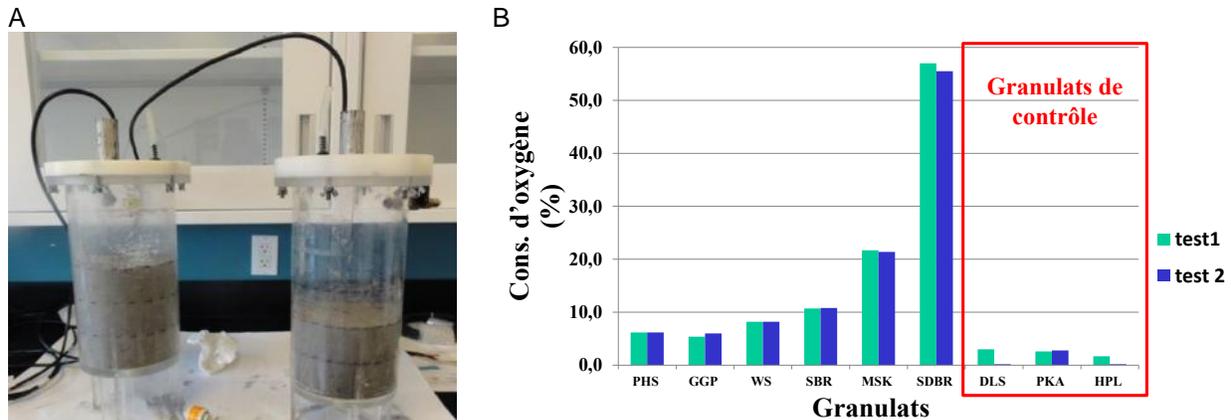


Figure 6 : A. Montage utilisé pour l'essai de consommation d'oxygène. B. Résultats des essais de consommation d'oxygène réalisés dans le cadre du programme de recherche – série sous conditions optimales (Rodrigues, 2016; Rodrigues et al., 2016a).

5.4 Investigations en laboratoire : Étape 3 - essai d'expansion sur mortier

Basé sur une revue exhaustive de la littérature et de nombreuses analyses effectuées sous des conditions bien contrôlées en laboratoire, un essai accéléré d'expansion sur barres de mortier a été mis au point pour reproduire les mécanismes de détérioration observés à Trois-Rivières. Des barres de mortier sont fabriquées selon des caractéristiques s'apparentant aux éprouvettes fabriquées pour les essais de RAS (norme ASTM C 1260 - dosage en ciment de 440g, quantité de granulats 1200g, particules -5 mm + 150 μ m, e/c de 0,65) (Rodrigues et al., 2015). Le conditionnement des trois éprouvettes formant un lot (25 x 25 x 285 mm) est divisé en deux phases. La **Phase 1** vise à générer le processus d'oxydation des sulfures de fer et la formation d'acide sulfurique responsable de l'attaque sulfatique interne du mortier. Les barres de mortier sont ainsi conservées, pour une période de 3 mois, à 80°C/80% d'humidité relative avec 2 cycles de mouillage de 3 heures par semaine dans une solution oxydante d'hypochlorite de sodium (6%). À 90 jours, les barres sont transférées à 4°C/100% d'humidité relative en conservant les cycles de trempage dans la solution d'hypochlorite de sodium (6%) (**Phase 2**). Des mesures régulières de changement dimensionnel sont effectuées au cours de ces deux phases.

Une expansion supérieure à 0,10% à 90 jours (i.e. au cours de la **Phase 1**) pourrait engendrer le refus du granulat; toutefois, les essais réalisés dans le cadre de cette recherche ont démontré que ces conditions d'essais favorisaient également l'expansion des granulats susceptibles de RAS (Rodrigues et al., 2015), ce qui donc exigera de déterminer en parallèle le potentiel de RAS des granulats avec les méthodes conventionnelles. Dans le cas d'une expansion inférieure à 0,10% au cours de la **Phase I**, les éprouvettes sont alors transférées dans les conditions froides (4°C). Un comportement stable (non-expansif) sous ces conditions permettra l'acceptation du matériau granulaire (i.e. aucune expansion significative par formation de thaumasite et pas d'expansion par les granulats alcali-réactifs); toutefois, un comportement expansif au cours de la **Phase II** démontrera un potentiel de génération de thaumasite et, conséquemment, le rejet du matériau granulaire. Cette approche est basée sur l'étude de huit matériaux granulaires et devra être précisée par l'étude d'un plus grand nombre de granulats.

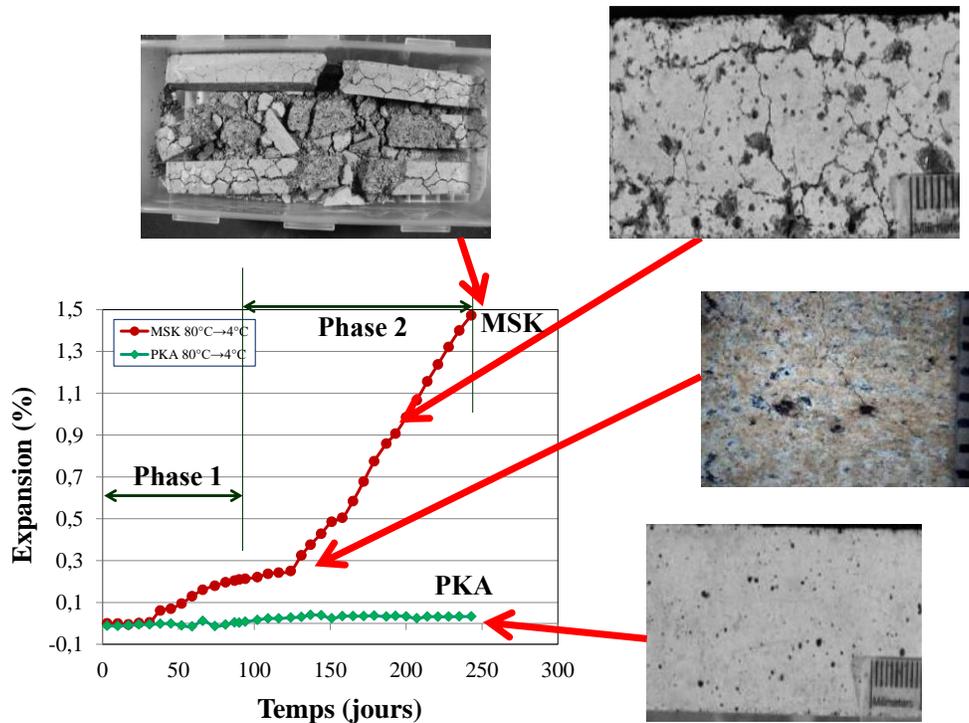


Figure 7 : Courbes d'expansion de barres de mortier incorporant un granulat témoin « non réactif » (PKA) et un granulat riche en pyrrhotite de la région de Trois-Rivières (MSK). L'état des éprouvettes de mortier à différentes étapes de l'essai est également illustré (Rodrigues et al., 2015).

6. CONCLUSION

De nombreux types de roches et, conséquemment, les matériaux granulaires à partir desquels ils sont obtenus, contiennent de petites quantités de sulfures de fer. Il apparaît donc irréaliste d'exiger que les granulats à béton ne contiennent aucune de ces phases minérales. L'analyse de nombreuses études montre que la pyrrhotite, même en très petite quantité, est potentiellement nuisible car elle pourra engendrer la détérioration prématurée de structures par des processus d'oxydation et de sulfatation. Malheureusement, il n'existe pas suffisamment de données permettant de déterminer clairement quelle quantité de pyrrhotite risque d'être néfaste ou inoffensive. En fait, l'établissement d'une teneur limite/nuisible « universelle » en pyrrhotite apparaît plus ou moins réaliste puisque plusieurs facteurs influencent la réactivité de ce minéral ou d'une combinaison de sulfures de fer.

Il n'existe actuellement aucune méthode d'essais permettant d'évaluer clairement le potentiel nuisible de matériaux granulaires face au phénomène d'oxydation des sulfures de fer. Dans le cas de sources de granulats exploitées depuis au moins une dizaine d'années, il apparaît possible d'établir le potentiel nuisible du matériau granulaire en étudiant la performance en service de structures en service et soumises à des conditions susceptibles d'engendrer l'oxydation des sulfures de fer. Ces travaux d'inspection devront toutefois être complétés par une cartographie détaillée de la source de granulats, de même qu'un examen pétrographique détaillé de carottes prélevées au sein d'éléments de la (ou des) structure(s) inspectée(s).

Un programme de recherche a ainsi été mené au cours de la période 2010-2014 afin de faire la lumière sur le processus ayant engendré la détérioration prématurée de nombreuses structures en béton dans la région de Trois-Rivières (Québec, Canada). Parmi les réalisations de ce programme, un protocole d'essais de performance capable de détecter les granulats problématiques a été développé. Les différents essais formant ce protocole (analyse chimique pour le soufre total, consommation d'oxygène et expansion sur mortier) ont été développés à partir d'une sélection de granulats incorporant ou non des sulfures de

fer, certains ayant été spécialement sélectionnés puisqu'à l'origine de problèmes dans des structures sur le terrain. Bien qu'il s'agisse d'un développement sans précédent sur le sujet, ces essais n'ont pas fait l'objet d'une évaluation poussée de leur « robustesse/précision ». De plus, les valeurs limite proposées dans le protocole ne sont que préliminaires puisqu'établies à partir d'un nombre limité de granulats (8). Un programme complémentaire à l'échelle canadienne est présentement en préparation dont l'objectif sera d'établir des spécifications/recommandations définitives quant à l'utilisation des granulats incorporant des sulfures de fer dans le béton.

7. REMERCIEMENTS

L'équipe de recherche aimerait remercier le Conseil de recherches en sciences naturelles et en génie du Canada (CRSNG) pour le financement obtenu dans le cadre d'une subvention de recherche et de développement coopérative, de même que tous les partenaires industriels et gouvernementaux du projet (ABQ, ACC, ACRGTQ, APCHQ, Garantie Qualité Habitation, ACQ, Inspec-sol inc., LVM, RBQ, Exp. Inc., SHQ, Ville de Québec, Ville de Montréal, Hydro-Québec, MTQ, Qualitas). Des remerciements sont également prodigués à B. Bussièrre et O. Peyronnard de l'UQAT, qui ont partagé leur expertise et connaissances sur l'utilisation de l'essai de consommation d'oxygène. A. Rodrigues a bénéficié d'une bourse doctorale de FCT-Fundação para a Ciência e Tecnologia, Portugal, Ref.: SFRH/BD/71203/2010.

8. RÉFÉRENCES

- ASTM C1260-14, "Standard Test Method for Potential Alkali Reactivity of Aggregates (Mortar Bar Method)," ASTM International, West Conshohocken, PA, 2012, 5 pp.
- Ayora, C., Chinchon, S., Aguado, A. et Guirado, F. (1998) Weathering of iron sulfides and concrete alteration: thermodynamic model and observation in dams from central Pyrenees, Spain, *Cement and Concrete Research*, 28: 1223–1235.
- Bédard, A., Lauzon, M.C. et Lee, C. (2016) Analyse de la dégradation d'infrastructures en béton et visite d'une carrière - Cas de Trois-Rivières. Rapport final - Cours Méthodes de terrain (GGL 3600), Université Laval, 50p.
- Béland, F. (2017) Caractérisation de produits de réaction et analyse de l'oxydation de sulfures de fer dans un béton atteint par la réaction alcalis-silice à la microsonde et à la micro-XRF. Rapport final de session - Cours Analyse des géomatériaux (GLG 7121), Université Laval, 21p.
- Belzile, N., Y.W. Chen, M.F.Cai, et Y. Li. (2004) A review on pyrrhotite oxidation. *Journal of Geochemical Exploration*, 84: 65–76.
- Bérard, J., Roux, R. et Durand, M. (1985) Performance of concrete containing a variety of black shale, *Canadian Journal of Civil Engineering*, 2: 58–65.
- BS EN 12620, "Aggregates for Concrete," British Standards Institution, London, UK, 2003, 48 pp.
- Casanova, I., Agullo, L. et Aguado, A. (1996) Aggregate expansivity due to sulphide oxidation – I. Reaction system and rate model, *Cement and Concrete Research*, 26: 993–998.
- Chinchón, J. S., Ayora, C., Aguado, A. et Guirado, F. (1995) Influence of weathering of iron sulphides contained in aggregates on concrete durability, *Cement and Concrete Research*, 25 (6): 1264–1272.
- CSA A23.1-14/A23.2-14 (2014) "Béton : Constituants et exécution des travaux/Méthodes d'essai et pratiques normalisées pour le béton," Canadian Standards Association, Mississauga, ON, Canada, Annexe P: Action des sulfures dans le granulats de béton sur le comportement du béton, 256-266.
- Deer, W., Howie, R. and Zussman, J. (1992). An introduction to the rock-forming minerals. 2nd Edition. Pearson education limited, England, 696p.
- De Villiers J.P.R. et Liles D.C. (2010) The crystal-structure and vacancy distribution in 6C pyrrhotite, *American Mineralogist*, 95: 148–152.
- Duchesne, J., Fournier, B., Rivard, P. et Shehata, M. (2010) Projet de recherche sur la détérioration du béton en présence de sulfure de fer. *Réunion annuelle Progrès dans le domaine du béton*, Chapitre du Québec et de l'est de l'Ontario de l'American Concrete Institute (ACI), Boucherville (Québec), 11p.

- Duchesne, J., Fournier, B., Shehata, M., Rivard, P. et Durand, B. (2014) Étude de la détérioration du béton en présence de sulfures de fer. Subvention de recherche et développement coopérative (CRSNG-RDC) – Rapport final, novembre 2014, 21p + 7 annexes.
- Francoeur, J. (2016) Étude de l'évolution de la détérioration du béton incorporant des granulats riches en sulfures de fer. Mémoire de maîtrise, Université Laval (Québec, Canada), 506p.
- Hagerman, T. et Roosaar, H. (1955) Damages to concrete caused by sulphide minerals, *Betong*, Swedish Concrete Association, 2: 151–161. In Swedish with English abstract and figure captions.
- Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC) (1997) Méthode d'essai No. 47 -Détermination de l'indice de fissuration d'un parement de béton. 8 p.
- Midgley, H. G. (1958) The staining of concrete by pyrite. *Magazine of Concrete Research*, August, 75-78.
- NF P18-301 (1983) "Granulats naturels pour bétons hydrauliques," Association Française de Normalisation (AFNOR), 10 pp.
- NF P18-541 (1994) Association Française de Normalisation (AFNOR), Granulats pour bétons hydrauliques.
- NF EN 12620 (2003) Granulats pour béton, Norme européenne – norme française (AFNOR), 55p.
- Ramos, V., Fernandes, I., Santos Silva, A., Soares, D., Fournier, B., Leal, S., Noronha, F. (2016) Assessment of the potential reactivity of granitic rocks — Petrography and expansion tests. *Cement and Concrete Research*, 86: 63-77.
- Rodrigues, A. (2016) Concrete deterioration due to sulfide-bearing aggregates. Thèse de doctorat, Université Laval (Québec, Canada), 366p.
- Rodrigues, A., Duchesne, J., Fournier, B., Rivard, P., Durand, B. et Shehata, M. (2012) Mineralogical and chemical assessment of concrete damaged by the oxidation of sulphide-bearing aggregates: importance of thaumasite formation on reaction mechanisms. *Cement and Concrete Research*, 42: 1336–1347.
- Rodrigues, A., Duchesne, J. et Fournier, B. (2015) A new accelerated mortar bar test to assess the potential deleterious effect of sulfide-bearing aggregate in concrete. *Cement and Concrete Research*, 73: 96-110.
- Rodrigues, A., Duchesne, J. et Fournier, B. (2016a) Quantitative assessment of the oxidation potential of sulfide-bearing aggregates in concrete using an oxygen consumption test. *Cement and Concrete Composites*, 67: 93-100.
- Rodrigues, A., Duchesne, J., Fournier, B., Durand, B., Shehata, M. et Rivard, P. (2016b) Evaluation protocol for concrete aggregates containing iron sulfide minerals. *ACI Materials Journal*, 113 (3): 349-359.
- Tagnit-Hamou, A., Saric-Coric, M. et Rivard, P. (2005) Internal deterioration of concrete by oxidation of pyrrhotitic aggregates. *Cement and Concrete Research*, 35: 99-107.
- Willie, K. and Zhong, R. 2016. "Investigating the deterioration of basement walls made of concrete in CT." Department of Civil and Environmental Engineering University of Connecticut, Storrs, CT 06269. 93 pp.

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