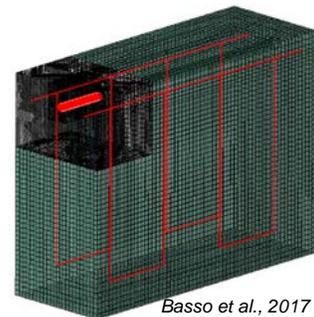
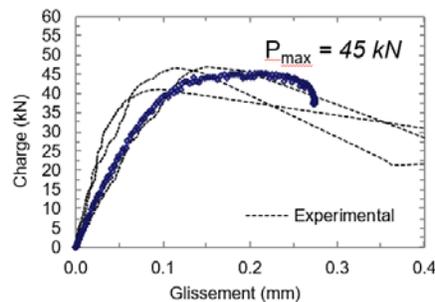


Actes de la 18^e édition des Journées Scientifiques

(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 PRÉCONTRAINTE 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 ENDOMMAGÉES 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

AMELIORER L'EVALUATION DES STRUCTURES ENDOMMAGEES PAR DES REACTIONS DE GONFLEMENT INTERNE A L'AIDE DE MODELISATIONS PHYSICO-CIMIQUES

S. Multon^A, A. Sellier^A

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

RÉSUMÉ : Les gonflements causés par des réactions chimiques internes aux bétons peuvent entraîner des déformations irréversibles importantes et remettre en cause la pérennité des structures endommagées. Plusieurs méthodologies ont été proposées pour réévaluer les ouvrages dégradés. L'utilisation de données d'entrée issues d'essais de gonflement obtenues sur éprouvettes de laboratoire est souvent évoquée mais plusieurs effets d'échelles rendent difficile cette utilisation directe des mesures obtenues sur éprouvettes. En effet, les expansions paraissent toujours plus longues et plus importantes sur les structures réelles que pour des mesures sur éprouvettes et ces résultats ne peuvent pas s'expliquer uniquement par les conditions de température et d'humidité. Cette communication traite de deux réactions couramment étudiées : la réaction alcali-silice et la formation différée d'ettringite. Les modélisations proposées sont basées sur des hypothèses simplificatrices afin de pouvoir être utilisées à la fois pour le calcul de gonflement d'éprouvettes de laboratoire et pour l'évaluation structurale d'ouvrages endommagés.

1. INTRODUCTION

Les réactions de gonflement interne (RGI) sont responsables de la dégradation d'un grand nombre d'ouvrages. Les origines physiques ou chimiques des gonflements peuvent provenir des trois constituants majeurs des bétons : granulats, ciment ou eau. Concernant la réaction alcali-silice, l'origine principale des expansions est la nature de la silice des granulats. En présence d'alcalins, fournis principalement par le ciment, une partie de la silice, dite réactive, de ces granulats passent en solution sous l'action des ions hydroxydes et est alors à l'origine de la formation de nouveaux hydrates constitués de silicates, d'alcalins et de calcium provoquant l'expansion du béton (Dent Glasser and Kataoka 1981; Poole 1992). Les réactifs provoquant les expansions peuvent également ne provenir que du ciment sous des conditions de mise en œuvre et / ou d'environnement particulières. Ainsi, la formation d'ettringite différée ou réaction sulfatique interne (RSI) trouve son origine en fonction de la composition du ciment (source de sulfates, d'aluminates et d'ions calcium nécessaires à la formation d'ettringite), des conditions de cure (température élevée, supérieure à 70°C pendant une période donnée) et d'environnement (température et humidité relative) (Taylor, Famy, and Scrivener 2001). La formation de l'ettringite primaire qui s'effectue habituellement dans les bétons au jeune âge peut en effet être empêchée par des températures élevées (supérieures à 70°C) trouvant leur origine dans un échauffement industriel dans le cas de pièces préfabriquées ou dans

l'élévation naturelle due à l'exothermie de l'hydratation du ciment dans le cas de pièces massives (éléments de ponts, barrages). Une fois la température redescendue à des valeurs courantes en condition d'ouvrages, l'ettringite peut de nouveau se former à conditions que les constituants (sulfates, aluminates, calcium et eau) soient réunis. La fixation de certaines de ces espèces dans les C-S-H et la présence d'alcalins peuvent empêcher ou retarder la présence simultanée de ces espèces en solution différant d'autant la précipitation de l'ettringite (Famy et al. 2001). Si elle peut se former en quantité importante, l'ettringite différée provoquera des pressions sur le béton entraînant des expansions et fissurations.

Les conséquences de ces réactions sont des déplacements et des fissurations des ouvrages atteints et des méthodologies doivent être envisagées pour évaluer les capacités portantes résiduelles de ces structures. Les gonflements trouvant leur origine dans des mécanismes physico-chimiques et les conséquences étant perceptibles à l'échelle de la structure, des approches multi-échelles doivent être envisagées. Les modélisations physico-chimiques doivent être suffisamment simples pour pouvoir être utilisées pour l'évaluation de très grandes structures et suffisamment complètes pour reproduire les effets d'échelle propres à ces pathologies. Dans cette communication, deux modélisations sont proposées, la première pour la réaction alcali-silice et la seconde pour la formation d'ettringite différée.

2. REACTION ALCALI-SILICE

L'approche chimique retenue peut être résumée par un bilan des alcalins réalisé à deux échelles : celle du granulat et celle du béton. A l'échelle du granulat, le bilan considère la diffusion dans les granulats et la fixation dans les gels. En effet, afin de représenter les différents types d'attaque de granulats, la diffusion ne peut être considérée comme le seul mécanisme pilotant la cinétique (Multon, Sellier, and Cyr 2009). Le modèle considère donc deux des mécanismes physiques présentés dans la littérature : la diffusion des ions hydroxydes et alcalins dans les granulats et la fixation des alcalins dans les gels formés après l'attaque de la silice par les ions hydroxydes. A l'échelle du béton, une équation de diffusion des alcalins est utilisée pour quantifier les mouvements d'alcalins dans l'éprouvette ou vers l'extérieur, en fonction des conditions aux limites.

2.1 Transport des espèces réactives dans les granulats

La première étape conduisant à la formation de gels d'alcali-réaction est régie par l'accès des ions hydroxyle et alcalin à la silice réactive des granulats. Les espèces ioniques pénètrent continuellement dans le granulat pour atteindre la silice réactive au cœur du granulat. Les travaux de modélisation de Poyet ont montré que la prise en compte de la diffusion dans la pâte de ciment entourant les granulats pouvait être négligée devant celle ayant lieu dans les granulats, qui est beaucoup plus lente (Poyet et al. 2007). En conséquence, la modélisation simplifiée développée dans (Multon, Sellier, and Cyr 2009) considère l'attaque des granulats à travers une équation de diffusion résolue pour chaque classe granulaire :

$$p_{agg} S_r \frac{d[Na^+]}{dt} = -div(\overrightarrow{\varphi_{Na}}) + S_{Na} \quad (\text{Équation 1})$$

avec : t le temps, p_{agg} la porosité du granulat, S_r le degré de saturation du granulat, $[Na^+]$ la concentration en alcalins, et S un terme source représentant la consommation des alcalins par le gel formé.

Afin de pouvoir résoudre le problème à l'aide de différences finies ne faisant intervenir qu'une seule variable d'espace, les granulats ont été supposés sphériques et homogènes. En termes de conditions aux limites, le flux est bien sûr considéré nul au centre de la particule et la concentration ionique à la frontière extérieure est supposée ne dépendre que de la quantité d'ions ayant diffusé dans les granulats sans prise en compte d'un appauvrissement dans la pâte de ciment proche du granulat. L'interaction entre les classes granulaires est donc considérée par une équation bilan globale pour toute la pâte de ciment.

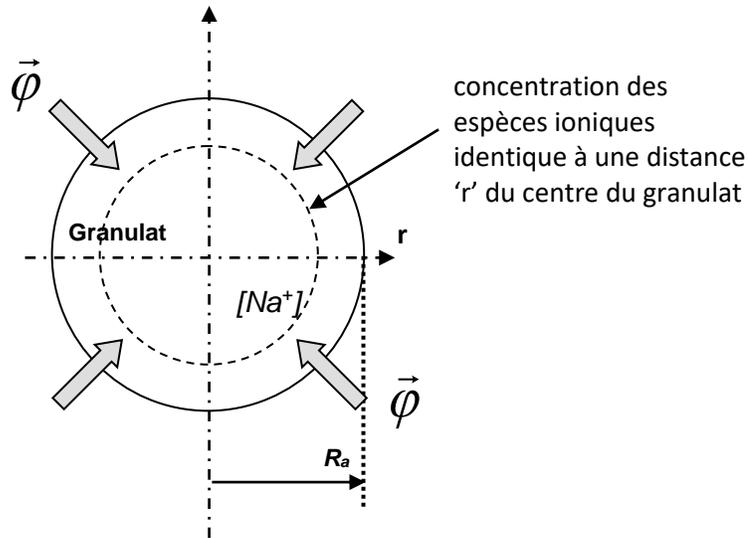


Figure 1 : Diffusion des alcalins dans un granulat

Naturellement, il s'agit ici d'une modélisation simplifiée des phénomènes de transport. Ce phénomène d'attaque extérieure du granulat est observé lors de l'examen microscopique de béton utilisant des granulats très réactifs (Ichikawa and Miura 2007; Ponce and Batic 2006) et ne présentant pas ou peu de fissuration avant attaque (L. Sanchez 2014; L. F. M. Sanchez et al. 2014). Cependant, de nombreux phénomènes perturbent ce mécanisme et les granulats sont rarement parfaitement homogènes. La diffusion est sans doute rendue plus rapide par la présence de fissures dans la particule avant les premiers gonflements (concassage) et ces propriétés doivent également être modifiées lors de l'apparition de fissures liées à l'attaque du granulat. En outre, la production de gel dans le granulat peut également être responsable d'un ralentissement du transport des espèces réactives. Ainsi, le paramètre prépondérant pour l'évaluation de la disponibilité des ions alcalins (coefficient de diffusion dans le granulat) est difficilement mesurable mais peut être obtenu par calibration de la cinétique des expansions obtenues lors d'essais. Ce mécanisme est responsable des différences de cinétiques des expansions en fonction de la taille des particules des granulats réactifs.

2.2 Attaque de la silice réactive des granulats

L'attaque de la silice réactive dépend de la concentration en espèce ionique réactive. Plus la concentration en ions hydroxydes et alcalins sera importante, plus l'attaque sera rapide. Ce taux d'attaque par les ions hydroxydes qui conduit à la formation des gels d'alcali-réaction a été modélisé par une équation simplifiée représentant la fixation des alcalins par les gels formés (Multon, Sellier, and Cyr 2009). Le taux de fixation est considéré ici proportionnel à la concentration en alcalins dans la porosité du granulat :

$$S_{Na} = \frac{\partial Na_f}{\partial t} = \frac{1}{\tau_f} \langle [Na^+] - [Na^+]_{thr} \rangle^+ \quad (\text{Équation 2})$$

avec: Na_f , la quantité d'alcalins fixés dans les gels, τ_f , le temps caractéristique de fixation des alcalins par la formation de gels. Plus ce temps caractéristique est grand, plus la fixation des alcalins et donc l'attaque de la silice se déroulent lentement.

Du fait de cette équation, les processus réactifs ne sont pas supposés instantanés comme dans de nombreux modèles. La combinaison des équations 1 et 2 permet ainsi de représenter les différents types d'attaques de granulats observés dans les ouvrages : attaque de type front depuis l'extérieur (granulats très réactifs, pilotage de la cinétique par la diffusion) ou attaque homogène dans les granulats (granulats à

réactivité lente, pilotage de la cinétique par les processus réactionnels) et naturellement les attaques intermédiaires.

2.3 Diffusion des alcalins hors du béton

La plupart des recommandations ou normes d'essai d'expansion pour caractériser l'alcali-réaction propose de conserver les échantillons en condition de température et d'humidité élevée pour accélérer les phénomènes et donc les gonflements. Toutefois, plusieurs études ont montré qu'une conservation à 95 % d'humidité relative était suffisante pour provoquer des pertes importantes d'alcalins par diffusion vers l'extérieur du béton (Rivard et al. 2003) et ainsi des gonflements significativement différents en fonction de la taille des éprouvettes (Lindgård et al. 2013). Cet aspect a été peu étudié par les travaux de modélisation. Par conséquent, il était intéressant de coupler les équations précédentes qui représentent ce qui a lieu dans un volume élémentaire représentatif supposé isolé de l'extérieur en ce qui concerne les alcalins (soit échange supposé nul dans le cas d'éprouvettes conservées en humidité relative, soit échange instantané dans le cas d'éprouvettes conservées en solution alcaline) à une équation de diffusion à l'échelle de l'éprouvette :

$$p_c S_r \frac{\partial [Na^+]_c}{\partial t} = -div(\overrightarrow{\varphi}_{Na}^c) + S_{\Sigma Na_f}^c \quad (\text{Équation 3})$$

Avec p_c , la porosité du béton, S_r , le degré de saturation, $[Na^+]_c$, la concentration d'alcalins dans la solution porale du béton, $\overrightarrow{\varphi}_{Na}^c$, le flux d'alcalins dans l'éprouvette et $S_{\Sigma Na_f}^c$, la somme des alcalins pénétrant dans les granulats à chaque pas de temps déterminée par le calcul local. Ce dernier terme permet le couplage des phénomènes à l'échelle du granulats et à l'échelle de l'éprouvette.

Cette modélisation multi-échelles a permis par exemple d'analyser et de retrouver les différences de gonflements d'éprouvettes de tailles différentes (Figure 1 et Figure 2) à partir des données de lessivage des alcalins (Lindgård et al. 2013). Cet outil peut alors être utilisé pour déduire les gonflements théoriques qui pourraient avoir lieu en condition de lessivage totalement nul, qui pourrait être plus représentatif de la réalité du cœur d'un ouvrage massif.

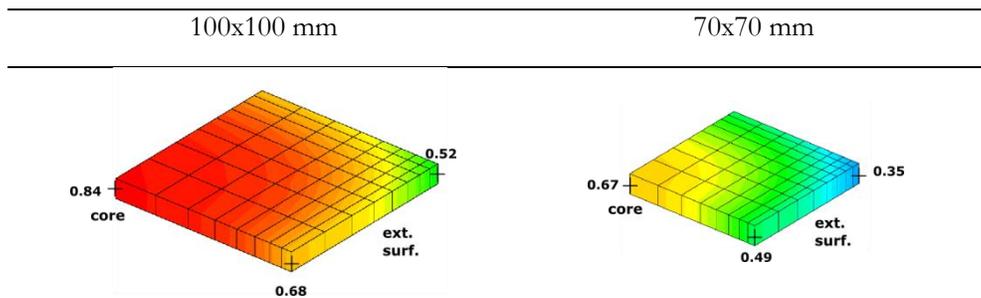


Figure 1. Avancement de la réaction alcali-silice dans des éprouvettes de tailles différentes (essais tirés de (Lindgård et al. 2013) et modélisation de (Multon and Sellier 2016))

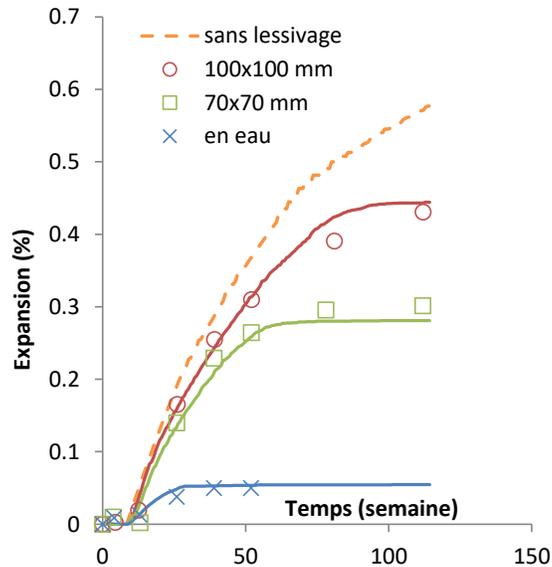


Figure 2 : Cinétiques de gonflement d'alcali-réaction en fonction de la taille des éprouvettes et des conditions de lessivage des alcalins en résultant (données expérimentales tirées de (Lindgård et al. 2013))

3. FORMATION DIFFEREE D'ETTRIGITE

La formation différée d'ettringite met en jeu différentes espèces présentes dans la solution interstitielle du béton (sulfates, aluminates, calcium et alcalins) qui, dans des conditions environnementales particulières (températures supérieures à 70°C pendant une certaine durée puis conservation ultérieure à des températures inférieures à 50°C, environnement très humide), conduisent à la formation d'ettringite ($\text{Ca}_6[\text{Al}(\text{OH})_6]_2 \cdot (\text{SO}_4)_3 \cdot 26\text{H}_2\text{O}$) dans un béton déjà durci et provoquent ainsi son endommagement. Les travaux de la littérature ont mis à jour les interactions entre les différents constituants du béton agissant sur la formation différée d'ettringite (espèces ioniques en solution, C-S-H, granulats) (Colleparidi 2003; Taylor, Famy, and Scrivener 2001). L'étude de la formation d'ettringite différée peut être décomposée en deux phases complémentaires :

- Pendant le cycle thermique à température élevée :
 - o Impossibilité de former de l'ettringite primaire du fait des températures élevées (ou déstabilisation dans le cas de cycle thermique tardif),
 - o Formation d'autres phases que l'ettringite utilisant les sulfates, aluminates et calcium rendus disponibles par la non précipitation de l'ettringite (portlandite CH, mono-sulfo-aluminate AFm, hydro-grenat siliceux HG),
 - o Fixation réversible d'une partie de ces espèces ioniques dans les C-S-H.
- Après le cycle thermique :
 - o Modification des conditions thermodynamiques liées à la baisse de la température et à un lessivage éventuel des alcalins,
 - o Libération des espèces ioniques fixées dans les C-S-H (aluminate, sulfate) et dissolution d'une partie de la portlandite en conditions de faible concentration en alcalins (libération de calcium),
 - o Précipitation de l'ettringite dans le béton une fois que les espèces la composant (sulfate, aluminate, calcium et eau) sont en présence en conditions stœchiométriques adéquates.

Comme pour l'alcali-réaction, le calcul de structures endommagées par la réaction sulfatique interne conduisant à la formation différée d'ettringite dans les ouvrages doit être basé sur la détermination d'un avancement de la réaction se produisant à différentes localisations dans les structures.

3.1 Principe

Les calculs de précipitation d'ettringite différée peuvent être basés sur les équations d'équilibre thermodynamique. Toutefois, une telle modélisation conduit à des calculs très non linéaires difficiles à utiliser dans le cadre du calcul d'ouvrages réels (Salgues 2013). Par conséquent, une modélisation simplifiée est proposée afin de prendre en compte les mécanismes principaux tout en conservant une résolution numérique qui peut être utilisée dans le cadre du calcul d'ouvrages de grandes dimensions.

Dans cette modélisation, les teneurs initiales en hydrates primaires (monosulfo-aluminate, AFm, et ettringite AFt) sont estimées à partir des teneurs en sulfate et en aluminate de la formulation de béton. Puis deux équations bilans pour les aluminates et les sulfates sont vérifiées à chaque pas de temps pour faire la part de ces espèces présentes dans les phases primaires et dans les phases secondaires. Les quantités restantes sont supposées disponibles à la formation de nouvelles phases en fonction des conditions de température et d'humidité.

Le bilan des aluminates est le suivant :

$$\tilde{A} = A^c - (AFt + AFm + C_3AH_6) - (DEF + HG) \quad (\text{Équation 4})$$

Avec A^c , la teneur initiale en aluminate, C_3AH_6 , est une phase qui peut exister si le rapport initial en SO_3 / Al_2O_3 est inférieur à 1. L'ettringite primaire AFt et secondaire DEF sont distinguées puisque seule la DEF est supposée pouvoir induire des gonflements. Les hydrogénéats HG pourraient se former à température élevée et fixer des aluminiums de manière irréversible.

De la même façon, l'équation bilan pour les sulfates est :

$$\tilde{S} = S^c - (3 AFt + AFm + G) - (3 DEF) \quad (\text{Équation 5})$$

S^c est la teneur initiale en sulfate. Du gypse G peut se former en fonction du rapport initial SO_3 / Al_2O_3 .

3.2 Impact de la durée d'exposition à une température élevée

Quand la température du béton est élevée, les phases primaires peuvent se dissoudre. La température capable de déstabiliser ces phases est notée θ^{th} . Cette température seuil dépend de la concentration en alcalins présente dans le béton (Kchakech 2015; Salgues 2013). Elle est déterminée par l'équation suivante :

$$\theta^{th} = \theta^{ref} \cdot \begin{cases} Na^{-n} & \text{if } Na > Na^{th} \\ Na^{th-n} & \text{if } Na \leq Na^{th} \end{cases} \quad (\text{Équation 6})$$

Quand elle a lieu, la dissolution des phases primaires est alors évaluée par l'équation suivante :

$$\frac{\partial (AFt + AFm)}{\partial t} = - \frac{AFt + AFm}{\tau^d} \quad (\text{Équation 7})$$

Avec τ^d le temps caractéristique de dissolution.

Pendant cette période, des hydrogarnets peuvent se former et consommer une partie des ions aluminates. Ceci est également pris en compte dans une équation différentielle du même type.

3.3 Précipitation d'ettringite secondaire à température ambiante

Quand la température est inférieure à θ^{th} , l'ettringite secondaire peut se former. Le taux de formation est alors supposé proportionnel à la quantité maximale d'ettringite secondaire DEF_{∞} pouvant être formée. Elle dépend de la quantité de phases primaires déstabilisées et la quantité d'aluminate fixée dans les hydrogarnets.

$$\frac{\partial DEF}{\partial t} = \frac{1}{\tau^p} (DEF_{\infty} - DEF) \quad (\text{Équation 8})$$

τ^p est le temps caractéristique de précipitation de l'ettringite secondaire. Il dépend des conditions de transfert local des ions mis en jeu par la précipitation de cette phase et de leur fixation dans les C-S-H. Il peut être calibré sur des courbes d'expansion.

La majorité des paramètres de ce modèle a été calibrée sur des essais de la littérature (Brunetaud 2005; Famy et al. 2001; Kchakech 2015; Martin 2010). A partir d'un seul jeu de paramètres, il permet ainsi de reproduire l'effet pessimum de la durée de cure sur l'amplitude des gonflements (Figure 4). Ce phénomène pourrait ainsi s'expliquer par la fixation irréversible d'une quantité importante d'aluminate dans les hydrogarnets, cette quantité dépendant directement de la durée d'exposition du béton aux fortes températures.

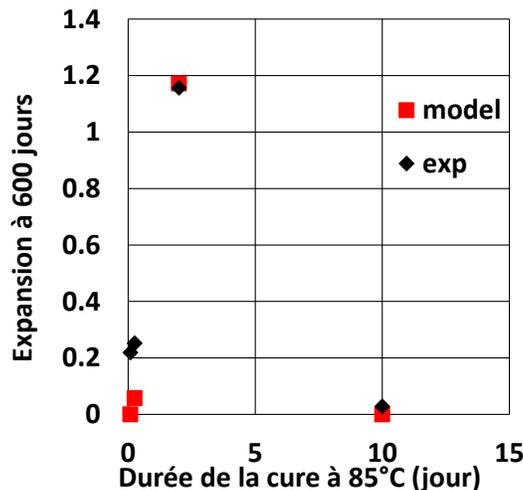


Figure 3 : Effet pessimum de la durée de cure sur l'amplitude des gonflements (points expérimentaux tirés de (Brunetaud et al. 2007))

L'action des alcalins sur la précipitation de l'ettringite est considérée à travers une relation empirique déterminée à partir des travaux présentés dans (Famy et al. 2001) :

$$\frac{\tau^{p^{ref}}}{\tau^p} = \begin{cases} \left(1 - \frac{Na}{Na^{bl}}\right)^m & \text{if } Na < Na^{bl} \\ 0 & \text{if } Na \geq Na^{bl} \end{cases} \quad (\text{Équation 9})$$

Avec une telle relation, si la concentration en alcalins dans le béton est supérieure à Na^{bl} , la formation d'ettringite différée est impossible. Il est alors possible de reproduire la dépendance des expansions en fonction de la concentration en alcalins de la solution de conservation (Figure 4).

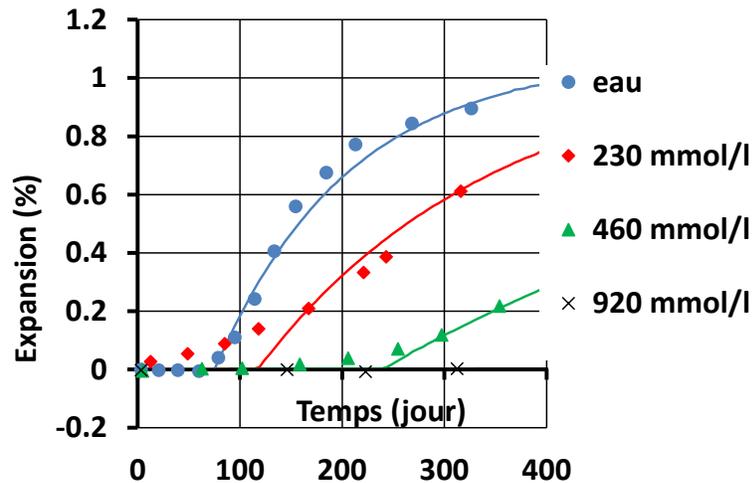


Figure 4 : Expansions de DEF en fonction de la concentration en alcalins de la solution de conservation (points expérimentaux tirés de (Famy et al. 2001))

4. CONCLUSION

La cinétique et l'importance des dégradations des ouvrages liées au développement de gonflements internes dépend directement des conditions physico-chimiques du béton. La majorité des modèles utilisés actuellement utilise des lois empiriques calibrées sur des essais de laboratoire avec peu de considération pour ces mécanismes. Deux modèles sont ici proposés, le premier pour la réaction alcali-silice et le second pour la formation différée d'ettringite. Dans les deux situations, il est ainsi possible de calculer l'avancement des dégradations à partir d'équations modélisant les interactions physico-chimique existant dans le béton et dépendant des conditions d'essais. Les approches proposées ont été simplifiées afin de réduire le nombre de paramètres et de variables pour qu'elles puissent être utilisées dans le cadre de calcul de structures réelles. Elles peuvent ainsi être combinées à différents types de modélisations mécaniques afin de déterminer l'avancement des expansions de manière plus réaliste.

5. REFERENCES

- Brunetaud, X. et al. 2007. "Effect of Curing Conditions and Concrete Mix Design on the Expansion Generated by Delayed Ettringite Formation." *Materials and Structures* 40: 567–78.
- Collepari, M. 2003. "A State-of-the-Art Review on Delayed Ettringite Attack on Concrete." *Cement and Concrete Composites* 25: 401–7.
- Dent Glasser, L.S., and N. Kataoka. 1981. "The Chemistry of Alkali-Aggregate Reaction." In *5th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction, Cape Town, South Africa*, S252/23.
- Famy, C., K. L. Scrivener, a. Atkinson, and a. R. Brough. 2001. "Influence of the Storage Conditions on the Dimensional Changes of Heat-Cured Mortars." *Cement and Concrete Research* 31: 795–803.
- Ichikawa, Tsuneki, and Masazumi Miura. 2007. "Modified Model of Alkali-Silica Reaction." *Cement and Concrete Research* 37: 1291–97.
- Kchakech, Badreddine. 2015. "Etude de L'influence de L'échauffement Subi Par Un Béton Sur Le Risque D'expansions Associées À La Réaction Sulfatique Interne, PhD Thesis, Ifsttar, Université Paris-Est."
- Lindgård, Jan et al. 2013. "Alkali-Silica Reaction (ASR) - Performance Testing: Influence of Specimen Pre-Treatment, Exposure Conditions and Prism Size on Alkali Leaching and Prism Expansion." *Cement and Concrete Research* 53: 68–90.

- Multon, Stéphane, and Alain Sellier. 2016. "Multi-Scale Analysis of Alkali-Silica Reaction (ASR): Impact of Alkali Leaching on Scale Effects Affecting Expansion Tests." *Cement and Concrete Research* 81: 122–33.
- Multon, Stéphane, Alain Sellier, and Martin Cyr. 2009. "Chemo-Mechanical Modeling for Prediction of Alkali Silica Reaction (ASR) Expansion." *Cement and Concrete Research* 39: 490–500.
- Ponce, J. M., and O. R. Batic. 2006. "Different Manifestations of the Alkali-Silica Reaction in Concrete according to the Reaction Kinetics of the Reactive Aggregate." *Cement and Concrete Research* 36: 1148–56.
- Poole, A.B. 1992. "Alkali-Silica Reactivity Mechanism of Gel Formation and Expansion." In *9th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete, London*, , 782–89.
- Poyet, S. et al. 2007. "Chemical Modelling of Alkali Silica Reaction: Influence of the Reactive Aggregate Size Distribution." *Materials and Structures* 40: 229–39.
- Rivard, Patrice, M.A. Bérubé, Jean Pierre Ollivier, and Gérard Ballivy. 2003. "Alkali Mass Balance during the Accelerated Concrete Prism Test for Alkali-Aggregate Reactivity." *Cement and Concrete Research* 33: 1147–53.
- Salgues, Marie. 2013. "Modélisations Des Effets Structuraux Des Réactions Sulfatiques Internes et Alcali-Granulats : Application Aux Barrages En Béton, PhD Thesis, Université de Toulouse."
- Sanchez, L.F.M. et al. 2014. "Comparative Study of a Chemo–mechanical Modeling for Alkali Silica Reaction (ASR) with Experimental Evidences." *Construction and Building Materials* 72: 301–15.
- Sanchez, Léandro. 2014. "Contribution to the Assessment of Damage in Aging Concrete Infrastructures Affected by Alkali-Aggregate Reaction, Thèse de Doctorat, Université Laval, Québec, Canada."
- Taylor, H. F W, C. Famy, and K. L. Scrivener. 2001. "Delayed Ettringite Formation." *Cement and Concrete Research* 31: 683–93.

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 



Association
Canadienne
du Ciment



EUCLID CANADA

