

Québec, le 10 février 2017

Marcel Nicolas

Président

**Groupe Synergie Construction**

337, Grande-Allée Est,

Grande-Rivière, Qc, G0C 1V0

Objet : Document Technique – Révision 1

Monsieur Nicolas,

SIMCO Technologies inc. (SIMCO) a été mandatée afin de produire un document technique décrivant l'importance de la présence de l'eau, et de son rôle, dans les mécanismes de dégradations du béton. Une brève revue de la littérature a été effectuée afin d'identifier et d'expliquer les différentes dégradations du béton.

Le béton peut se dégrader différemment dépendamment de l'environnement dans lequel il se retrouve. Voici les principaux mécanismes de dégradations :

- La réaction alcalis-granulats;
- La formation d'ettringite différée;
- Les cycles de gel-dégel;
- La corrosion des armatures;
- L'attaque par les sulfates;
- L'écaillage;
- La carbonatation;
- La réaction de la pyrite ou de la pyrrhotite.

Mentionnons que le béton est un matériau poreux. Ainsi, il est susceptible à la pénétration d'agent (i.e., liquides ou ions) à travers son milieu poreux. La totalité de ces mécanismes de dégradations peuvent être influencés par la présence d'eau. Chacun de ceux-ci sont brièvement expliqués ci-dessous en portant une attention particulière au rôle de l'eau pour chaque dégradation.

## 1. DÉGRADATIONS INTERNES DU BÉTON

### 1.1. RÉACTION ALCALIS-GRANULATS (RAG)

Cette dégradation est causée par la réaction des alcalis du ciment avec une phase réactive que peut contenir les granulats. Deux types de réaction alcalis-granulats sont présentement connus, soit la réaction alcalis-silice et la réaction alcalis-carbonate. La réaction alcalis-granulats consiste en une dégradation du granulat contenu dans le béton. Celle-ci peut entraîner une dilatation qui par la suite cause de la fissuration dans la pâte de ciment. Selon *Dosage et contrôle des mélanges de béton*, un taux d'humidité suffisant est une des conditions afin d'activer la réaction alcalis-silice [4]. En effet, la teneur en alcalis doit être élevée, les granulats doivent contenir une phase réactive (i.e., silice ou carbonate) et le taux d'humidité doit être supérieur à 80% afin que la réaction puisse se produire.

### 1.2. FORMATION D'ETTRINGITE DIFFÉRÉE

L'ettringite se forme lors de l'hydratation du ciment. Ce type d'ettringite n'est pas problématique parce que celle-ci se forme lorsque la pâte n'est pas durcie. Par contre, lorsque la température d'hydratation dépasse 70°C-100°C [4], il y a une possibilité que seulement des monosulfoaluminates se forment à la place de l'ettringite. Lorsque la température diminue après la prise, les monosulfoaluminates peuvent réagir avec les sulfates des CSH et se transformer en ettringite dans la pâte durcie. Ce phénomène est appelé ettringite différée. Lorsque l'ettringite différée se forme, le milieu est confiné. L'ettringite différée est donc plus massive (i.e., elle est expansive) et cause des contraintes dans la pâte durcie ce qui entraîne la fissuration du béton. Par contre, ce phénomène se produit seulement en présence d'humidité [1]. Pour éviter la formation d'ettringite différée, la norme CSA A23.1 section 8.5.5 restreint la chaleur d'hydratation à 70°C [3]. Il y a un plus gros risque d'ettringite différée pour les bétons préfabriqués, mais aussi pour les bétons de masse.

### 1.3. PYRITE ET PYRRHOTITE

Le granulat peut contenir des sulfures qui en présence d'eau et d'oxygène produiront une réaction délétère pour la pâte de ciment. Rodrigue et al. « ont considéré qu'en présence d'eau et d'oxygène la pyrrhotite s'oxyde pour former des oxyhydroxydes de fer et de l'acide sulfurique. » [3]. L'expansion est causée par la réaction de cet acide avec les phases de la pâte et des granulats du béton [7]. Plusieurs publications rapportent l'effet dévastateur de cette réaction pour le béton. Les fondations des bâtiments ayant que quelques mois peuvent être complètement détruite lors de la présence de pyrrhotite [5]. Il a été observé que la pyrrhotite réagit beaucoup plus rapidement que la pyrite dans les milieux alcalins du béton [8].

## 2. DÉGRADATION DUE À L'ACTION DU GEL

### 2.1. CYCLES DE GEL-DÉGEL

Les cycles de gel-dégel sont une des principales causes de dégradation du béton dans les pays nordiques. Un béton exposé à des cycles de gel-dégel ainsi qu'à un taux d'humidité élevé peut se dégrader rapidement. Lorsque l'eau gèle et se transforme en glace, celle-ci prend une expansion de 9 % de son volume initial. Alors, cette transformation occasionnera des contraintes de traction dans la pâte du béton. Lorsque ces contraintes sont plus grandes que la résistance en traction du béton, la pâte se fissure. Ces forces peuvent être réduites en produisant un béton à air entrainé qui offrira un volume de vides non-perméables suffisant pour accueillir cette expansion. Un béton est considéré résistant aux cycles de gel-dégel lorsque le réseau de bulles d'air ainsi que le facteur d'espacement sont adéquats. Par contre, lorsque le béton est exposé à un taux d'humidité faible et que le béton n'est pas saturé, il y aura peu d'eau dans le béton et donc les risques de dommages causés par l'action du gel et dégel sont faibles [4].

### 2.2. ÉCAILLAGE

L'écaillage est caractérisé comme une perte de pâte à la surface du béton. L'écaillage est principalement visible par des défauts de surface du béton exposés aux cycles de gel-dégel. L'écaillage du béton survient lorsque la surface est saturée. La saturation de la surface limite le volume de vide en surface ou l'expansion causé par le gel de la glace pourrait se produire. L'expansion cause donc des contraintes et lorsque ces forces en surface dépassent la résistance à la traction de la pâte, il y a de l'écaillage. La présence de sel de déglacage dans l'eau diminue la pression vapeur du liquide ce qui lui permet de saturer d'avantage le béton. Alors, même si la présence de sel permet au liquide de geler à plus basse température que s'il n'y avait pas de sel, la dégradation est plus grande [6].

## 3. CONTAMINATION EXTERNE DU BÉTON

### 3.1. CORROSION DES ARMATURES

Lorsque le béton est sain, celui-ci a un pH élevé (habituellement plus haut que 12.5) ce qui protège naturellement l'acier d'armature de la corrosion en formant un film protecteur. Par contre, lorsque les ions chlore provenant de l'eau de mer ou des sels de déglacage pénètrent dans le béton, ceux-ci peuvent détruire le film ou simplement passer au travers. La vitesse de pénétration des chlores dans la pâte du béton dépend :

- De la perméabilité de la pâte. Une pâte peu perméable ralentira la progression des ions chlore dans la pâte du béton.
- De l'humidité ambiante, car l'eau transporte les ions dans la pâte.

Lorsque la tolérance de contenu en chlore est atteinte, la corrosion est à risque de débuter. Cette tolérance se situe à environ de 0,30 % de chlorures totaux par masse de ciment selon la Federal Highway Administration [9]. Une fois amorcée, la vitesse de corrosion de l'acier dépend :

- De la résistivité du béton;
- De la teneur en eau;
- Du taux de migration de l'oxygène.

Lorsque le fer se transforme en rouille, il peut gagner jusqu'à six fois son volume initial ce qui occasionne des contraintes dans le béton et qui ultimement le fera fissurer. De plus, la réaction de corrosion peut réduire la section de l'acier d'armature et ainsi diminuer la capacité de la barre d'acier. La présence d'eau est nécessaire sur deux aspects : le mouvement des ions chlorure dans le béton et la réaction de corrosion. En effet, lorsque l'humidité dans le béton descend en dessous de 50%, la propagation de la corrosion est faible pour un béton contaminé aux ions chlorures [2].

### 3.2. ATTAQUE PAR LES SULFATES

Les sulfates, qui proviennent généralement du sol ou de l'eau, peuvent attaquer le béton en réagissant avec les produits résultants de l'hydratation<sup>1</sup> du ciment. Certaines réactions vont former de l'ettringite, d'autres vont causer une perte de cohésion de la pâte, ou dégradé autrement le béton dépendamment de la nature de la source de sulfates [4]. La présence d'eau est essentielle pour obtenir une réaction des sulfates avec le béton. L'eau a comme rôle de transporter les sulfates dans la pâte du béton. Alors, afin d'augmenter la résistance aux attaques par les sulfates, la perméabilité du béton ou l'humidité ambiante doit être réduite [1].

### 3.3. CARBONATATION

Le gaz carbonique ( $\text{CO}_2$ ) (i.e., la pollution présente dans l'air) réagit avec l'hydroxyde de calcium ( $\text{CaOH}_2$ ) pour former du carbonate de calcium ( $\text{CaCO}_3$ ). Cette réaction ne dégrade pas la pâte directement, mais elle réduit le pH du béton. Mentionnons que le pH élevé du béton permet de passiver les aciers d'armature. Cette passivation offre un film protecteur à l'acier d'armature contre la corrosion. Ce phénomène de baisse de pH peut donc potentiellement dépassiver les barres d'armature. La vitesse de carbonatation est plus rapide dans un environnement ayant une humidité relative d'environ 50 % [4]. Le  $\text{CO}_2$  se dissout dans l'eau c'est pour cette raison que l'eau doit être présente. Par contre, la vitesse de diffusion de ce gaz est quatre fois plus faible dans l'eau que dans l'air. Pour cette raison, la réaction de

---

<sup>1</sup> L'hydratation du ciment est la réaction exothermique qui se produit lorsque le ciment entre en contact avec l'eau. Le ciment est principalement composé de silicate tricalcique ( $\text{C}_3\text{S}$ ), de silicate bicalcique ( $\text{C}_2\text{S}$ ), d'aluminate tricalcique ( $\text{C}_3\text{A}$ ) et d'aluminoferrite tétracalcique ( $\text{C}_4\text{AF}$ ). Lorsque les deux phases silicate réagissent, elles produisent des silicates de calcium hydratés (CSH) et des hydroxydes de calcium ( $\text{CaOH}_2$ ) qui sont les principaux produits de l'hydratation. Les CSH procurent la prise, la résistance ainsi que la stabilité volumétrique au béton.

carbonatation dégrade moins le béton lorsque l'environnement est saturé. La carbonatation dépend aussi de la concentration en CO<sub>2</sub> de l'atmosphère. En région rurale, cette concentration est d'environ 0,03 % et en région urbaine la concentration en CO<sub>2</sub> est d'environ 0,3 % [4].

## 4. CONCLUSIONS

En guise de conclusion, il a été présenté que les principaux mécanismes de dégradations du béton sont généralement influencés par la présence de l'eau contenue dans le béton. En effet, lorsque l'apport en eau est réduit, les effets de la réaction alcalis-granulats, la formation d'ettringite différée, les cycles de gel-dégel, la corrosion des armatures, l'attaque par les sulfates, l'écaillage et la réaction de la pyrrhotite et de la pyrrhotite sont diminués.

D'autres types de dégradation existent dont entre autres l'abrasion et l'érosion. Ces phénomènes sont plutôt d'ordre physique et mécanique qu'interne au béton. Ainsi, l'eau peut par écoulement seulement produire une abrasion du béton.

Finalement, mentionnons que généralement en diminuant le niveau d'eau contenu à l'intérieur du béton, la majorité des dégradations internes du béton seront ralenties, voire même arrêtées.

## SIMCO TECHNOLOGIES INC.



Ariane Maltais-Schiettekatte, ing. Jr.  
Ingénieure junior de projets  
OIQ : 5076195



Eric Ouellet, ing. M.Sc.  
Directeur de l'ingénierie  
OIQ : 115505

## BIBLIOGRAPHIE

1. ACI Comitee 201. (2016). ACI 201.2R-16 Guide to Durable Concrete. American Concrete Institute.
2. Bertolini, Luca, Elsener Bernhard, Pedefferri, Pietro et Polder, Rob. (2004). Corrosion of steel in concrete. Weinheim, Allemagne.
3. Groupe CSA. (2015). A23.1-14/A23.2-14 Béton: Constituants et executions des travaux/Méthodes d'essai et pratiques normalisées pour le béton. Ontario, Canada.
4. H. Kosmatka, Steven, Kerkhoff, Beatrix, Hooton, R. Douglas et J. McGrath Richard. (2011). *Dosage et contrôle des mélanges de béton* (8e éd.). Québec : Association Canadienne du Ciment.
5. Moum, J., I. et Rosenqvist, T. (1959). Sulphate attack on concrete in the Oslo region, American Concrete Institute, Detroit, Journal, Septembre, pp. 257-264.
6. Pigeon M. et Pleau R. (1995). Durability of Concrete in Cold Climates. E & FN Spon, London.
7. Rodrigues, A. P. 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 (2012) 1336-1347.
8. Schmidt, T., Leemann, A., Gallucci, E. et Scrivener, K. (2011). Physical and microstructural aspects of iron sulphide degradation in concrete», *Cement and Concrete Research*, Vol. 41, pp. 263-269.
9. VIRMANI Y. Paul et CLEMENA Gerardo G. (1998). Corrosion Protection – Concrete Bridges, Federal Highway Administration. pp. 72.