

## Pathologie

# Les réactions sulfatiques

## (Partie I)

Les réactions sulfatiques entraînent des désordres parfois sévères, susceptibles d'impacter la durée de vie des ouvrages et des structures en béton. Elles sont de deux types : réaction sulfatique externe (RSE) et réaction sulfatique interne (RSI). Dans les deux cas, les désordres sont dus à la formation d'ettringite expansive. Partie I de l'analyse du phénomène en partenariat avec le Lerm Setec\*.

### I - Quels sont les différents types d'ettringite ?

On distingue trois catégories d'ettringite selon le moment et les conditions de sa formation<sup>1</sup>:

- l'ettringite de formation primaire (a), qui ne provoque pas d'expansion ;
- l'ettringite de formation secondaire (b), qui peut provoquer une expansion ;
- l'ettringite de formation différée (c), consécutive à une élévation de température subie par le béton pendant les premières heures ou jours après coulage, qui peut aussi provoquer une expansion.

**a - L'ettringite de formation primaire** (Fig. 1) correspond à un produit normal issu de l'hydratation des ciments. Elle se forme par réaction entre les sulfates présents dans le régulateur de prise (gypse, hémihydrate, anhydrite) et les aluminates de calcium. De faciès aciculaire, ces cristaux précipitent à partir de la solution interstitielle dans la porosité du béton et ne provoquent pas de gonflement. Ils revêtent même un caractère bénéfique, puisqu'ils contribuent à la cohésion de la pâte de ciment au jeune âge. L'ettringite primaire constitue même l'hydrate principal de certains types de liants comme les ciments sursulfatés et sulfo-alumineux.

**b - L'ettringite de formation secondaire** (Fig. 2) correspond à une ettringite qui cristallise dans le béton durci. Il peut s'agir de l'ettringite formée par dissolution et recristallisation de l'ettringite pré-existante (notamment l'ettringite primaire). Ceci, à la faveur de circulation d'eau à l'intérieur d'un béton exposé à un environnement humide. Ce type d'ettringite, bien cristallisée, n'a pas de caractère expansif, car elle précipite aussi dans les espaces libres (porosité, bulles d'air, interfaces pâte-granulats).

Elle est à distinguer de l'ettringite secondaire qui se forme en lien avec des apports externes de sulfates (sols riches en sulfates, eau de mer, ouvrages

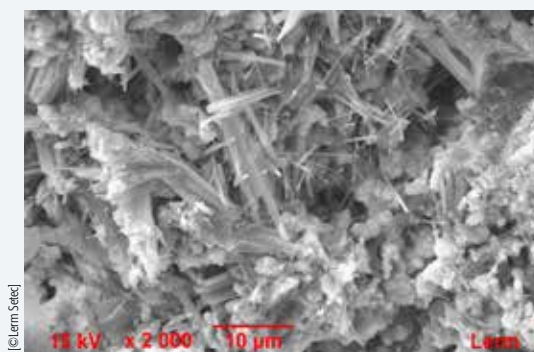


Fig. 1 : Ettringite primaire non expansive dans la porosité de la pâte de ciment, vue au microscope électronique à balayage.

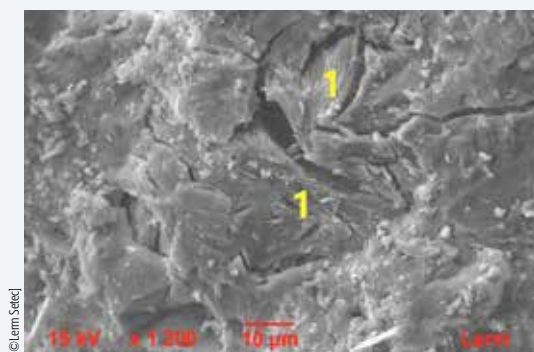


Fig. 2 : Ettringite secondaire massive (1), vue au microscope électronique à balayage.

d'assainissement...), lorsque le béton est formulé avec un liant non résistant aux sulfates, souvent riche en aluminat tri-calcique ( $C_3A$ ). On parle alors de réaction sulfatique externe (RSE). Les sulfates peuvent toutefois aussi avoir une origine interne (granulats naturels ou artificiels riches en sulfates, forte teneur en régulateur de prise, pollution éventuelle). Ce cas s'apparente à une forme de réaction sulfatique interne (RSI). Ce type d'ettringite secondaire précipite sous forme d'amas massifs au droit des sites réactifs, dans un milieu confiné. Elle peut alors provoquer un gonflement à l'origine d'une fissuration et d'une perte de cohésion du matériau, plus ou moins important.

Retrouvez la version enrichie de cet article sur [acpresse.fr/](http://acpresse.fr/) ou



ENVIE D'ELARGIR VOS CONNAISSANCES ?

Tout notre fonds scientifique sur [acpresse.fr/Béton](http://acpresse.fr/Beton) rubrique **Savoirs**

NOTRE SÉLECTION

**Pathologie**  
La carbonatation  
par Abdelkrim Ammouche,  
Directeur technique et scientifique Lerm (groupe Setec)



**Connaissances fondamentales**  
Durabilité des bétons

par Lotfi Hasni,  
Directeur de projets chez Ginger-CEBTP



**c - L'ettringite de formation différée** (Fig. 3) est issue d'une réaction sulfatique interne (RSI) consécutive à un échauffement du béton aux jeunes âges. Les bétons susceptibles d'être concernés sont ceux ayant subi, au jeune âge (après coulage), un échauffement à une température supérieure à 65–70 °C, non compatible avec la composition minéralogique et chimique de leur liant et avec leur exposition ultérieure à un environnement humide. De telles conditions de température peuvent se produire au cours d'étuvage d'éléments préfabriqués ou dans le cas de pièces massives coulées en place. Au-delà d'environ 65 °C, l'ettringite primaire ne peut pas se former ou alors elle se décompose. Une part importante des sulfates et des aluminates se retrouve dans les C-S-H sous forme d'ions ( $SO_4^{2-}$ ) adsorbés et sous forme de nanocristaux de mono-sulfo-aluminates. L'exposition du béton à un milieu très humide favorise la remobilisation des ions sulfates qui réagissent avec les aluminates disponibles pour former de l'ettringite dans un milieu confiné au sein de la matrice hydratée, générant des pressions de gonflement élevées et des désordres pouvant être importants.

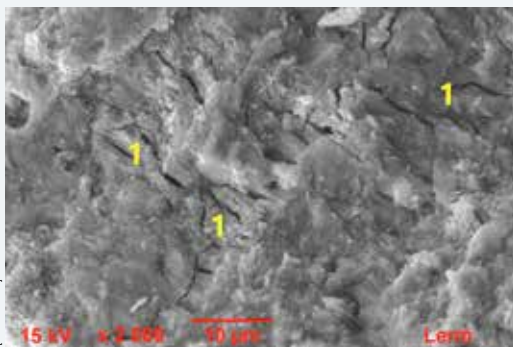


Fig. 3 : Ettringite différée massive (1), vue au microscope électronique à balayage.

## 2 - Quelles peuvent en être les conséquences ?

**a** - Les désordres dus à la RSE se manifestent par une (micro)fissuration, un accroissement de la porosité et une perte de cohésion du béton. Ces désordres sont évolutifs selon la progression du front de sulfates à l'intérieur du béton depuis la surface exposée. En cas de progression significative de ce front d'agression, la protection des armatures vis-à-vis du risque de corrosion peut être fortement diminuée.

**b** - La RSI provoque un phénomène d'expansion dans la masse du béton. A l'échelle macroscopique, les désordres induits sont assez similaires à ceux causés par l'alcali-réaction<sup>2</sup>. Ils se manifestent par une fissuration sous forme de faïençage à maille décimétrique, souvent anarchique, mais parfois régulière suivant plus ou moins les mailles d'armatures. Les fissures sont superficielles, de quelques centimètres de profondeur, mais elles peuvent être plus profondes dans des structures massives.



Béton de revêtement d'un tunnel soumis à une agression par les sulfates transportés via une fissure de retrait.

Les propriétés mécaniques du matériau sont affectées. Au niveau de la structure ou de l'élément de structure, les contraintes de gonflement, combinées aux contraintes mécaniques dues aux sollicitations normales, peuvent induire des tensions internes supérieures à la résistance à la traction du béton et des surtensions au niveau des aciers passifs ou de précontrainte. La résistance structurale (capacité portante) peut s'en retrouver impactée.

En somme, la RSI peut entraîner des conséquences sur les caractéristiques du matériau, sur la résistance structurale (capacité portante), mais aussi sur la protection des armatures du fait de la fissuration. En général, les désordres apparaissent au bout de quelques années (entre 5 et 10 ans environ, parfois plus) et peuvent être plus ou moins évolutifs selon l'importance du phénomène et les conditions d'exposition de la structure.

**Abdelkrim Ammouche**  
Direction technique et scientifique  
Lerm Setec\*

<sup>1</sup> Grandubé - Grandeurs associées à la durabilité des bétons - chapitre 1.4 Réactions Endogènes, Presses de l'école Nationale des Ponts et Chaussées, 2007.  
<sup>2</sup> Béton[s] n°101. L'alcali-réaction, juillet/août 2022.

\*En tant que laboratoire et société d'études et conseil faisant partie de Setec, groupe d'ingénierie indépendant et pluridisciplinaire, le Lerm (Laboratoire d'études et de recherches sur les matériaux) est spécialisé dans l'étude des matériaux de construction et la durabilité des ouvrages. Les réactions sulfatiques font partie des sujets étudiés et maîtrisés par le laboratoire.

## Le sel de Candlot

La dégradation des bétons par les sulfates, principalement liée à la formation d'ettringite, peut conduire à l'apparition de désordres sévères. Depuis plus de soixante-dix ans, de nombreux cas d'altération du béton par les sulfates ont été signalés : fondations en béton au contact de sols enrichis en sulfates, ouvrages en béton exposés au milieu marin...

Vers 1890, Edouard Louis Candlot (1858 - 1922) identifie pour la première fois la présence d'ettringite dans la pâte de ciment hydratée, conduisant ainsi à sa première appellation de "sel de Candlot". Un peu plus tard, Henri Le Châtelier écrit que l'ettringite est la cause principale, sinon exclusive, de la dégradation chimique de la pâte de ciment par l'eau de mer. Néanmoins, ce n'est qu'en 1970, que A. E. Moore et H. F. W. Taylor déterminent la structure cristalline de l'ettringite.

Retrouvez la partie II  
de l'article

"Les réactions sulfatiques"  
dans Béton[s] le Magazine  
n° 104  
Janvier/Février 2023