

Pathologie

Les réactions sulfatiques

(Partie II)

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 II de l'analyse du phénomène, en partenariat avec le Lerm Setec*.

III - Comment prévenir les réactions sulfatiques ?

Différents paramètres chimiques interviennent dans la formation d'ettringite : teneur en sulfates et en aluminates, et leurs proportions relatives. Mais aussi en chaux ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) disponible, qui a une influence significative sur la solubilité de l'ettringite. Ces paramètres varient selon le type de ciments et en particulier, la présence d'additions minérales hydrauliques ou pouzzolaniques (laitier de hauts fourneaux, cendres volantes, pouzzolanes). Le choix d'un ciment résistant aux sulfates est une condition essentielle à la limitation du risque de formation d'ettringite expansive, qui doit être associée à la mise en œuvre d'un béton compact limitant la pénétration des ions agressifs. Les textes en vigueur (FD P18-011, NFEN 206/CN, Fascicule 65) permettent de concevoir des bétons durables et résistants en milieux sulfatiques. Par ailleurs, les sources de sulfates internes doivent être maîtrisées par le contrôle des constituants du béton (ciments, granulats, additions, eau de gâchage), conformément aux normes respectives.

Dans le cas de l'ettringite de formation différée consécutive à un échauffement, les facteurs influant sont la température maximale atteinte dans le béton au jeune âge et la durée de son maintien. Mais aussi la teneur en sulfates, en aluminates, en chaux, en alcalins et le degré d'exposition à l'humidité.

Les additions minérales pré-citées ont un double rôle. Elles permettent de réduire la chaleur d'hydratation et améliorent la résistance vis-à-vis de la RSI par les modifications qu'elles apportent sur la composition chimique, minéralogique et la micro-structure de la matrice liante.

Les recommandations RSI mises à jour en 2017¹ fournissent un ensemble de dispositions permettant de se prémunir de ce phénomène. Ceci, en définissant un niveau de prévention (As, Bs, Cs ou Ds), selon la catégorie de l'ouvrage (I, II, III) et sa classe d'exposition (XH1, XH2, XH3). Ces dispositions portent à la fois sur la



Semelle de pile de pont affectée par une réaction de gonflement interne due à la formation d'ettringite différée (RSI).



Les additions minérales, tels les laitiers moulus de hauts fourneaux permettent de réduire la chaleur d'hydratation et améliorent la résistance du béton vis-à-vis de la RSI.

conception (impactant les dimensions des éléments), le choix du liant et du béton, et les conditions de mise en œuvre. L'essai performantiel LPC n° 66 permet de valider l'utilisation d'une formulation de béton pour un cycle d'échauffement donné.

IV - Que faire lorsque ça arrive ?

En premier lieu, les bétons suspectés d'être affectés par une réaction sulfatique doivent faire l'objet d'un diagnostic s'articulant autour d'examen au microscope électronique à balayage. C'est la seule technique permettant d'identifier avec certitude le caractère potentiellement expansif de l'ettringite,

Retrouvez cet article

sur 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
Les réactions sulfatiques
Partie I

par Abdelkrim Ammouche
Directeur technique et scientifique
Lerm (groupe Setec)



Pathologie
L'alcali-réaction

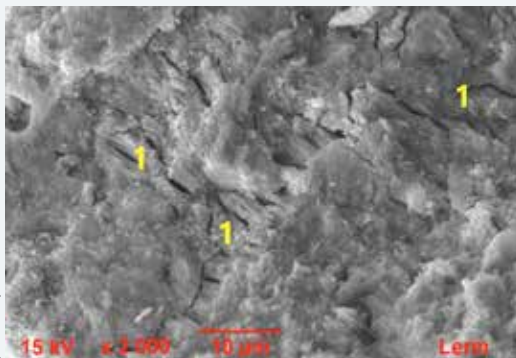
par Abdelkrim Ammouche
Directeur technique et scientifique
Lerm (groupe Setec)



de rechercher toute autre pathologie physico-chimique et d'évaluer l'épaisseur de béton dégradé (cas de la RSE). Ce diagnostic s'appuiera aussi sur des analyses chimiques et minéralogiques. Le programme d'investigation prendra en compte les données du dossier d'ouvrage (composition des bétons, déroulement du chantier, environnement et classes d'exposition).

Les bétons d'ouvrages ayant subi une altération par RSE peuvent, après diagnostic, être réparés de façon traditionnelle par purge des parties dégradées et polluées. Puis, par la mise en œuvre d'un produit de réparation adapté à la classe d'exposition. Et, si nécessaire, d'une protection de surface type revêtements.

Les ouvrages atteints de RSI doivent faire l'objet d'investigations visant à évaluer l'importance du phénomène, sa vitesse et son potentiel d'évolution futur. Dans le cas d'un phénomène jugé d'emblée comme étant sévère, l'impact éventuel sur la capacité portante de l'ouvrage doit être rapidement examiné. Le guide LCPC de 2003² fournit une méthodologie de suivi, basée sur des mesures de fissurations (méthode LPC n° 47) et de gonflements des éléments affectés. Ainsi que sur la mesure de l'expansion potentielle résiduelle (méthode LPC n° 67). Un autre guide LCPC de 2010³ propose une démarche de choix des traitements pour des ouvrages atteints de réactions de gonflement interne, en fonction de leur état et du potentiel d'évolution des phénomènes et leurs conséquences estimées.



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

En fonction du niveau d'expansion résiduelle et des caractéristiques de l'ouvrage (type d'armatures, conditions environnementales, conséquences des désordres structuraux...), une périodicité d'inspection peut être établie. Elle sera accompagnée, suivant le cas, de mesures de gonflement, d'instrumentation des fissures, d'injection, de découpe de joints d'expansion, de renforcements structuraux (installation de tiges ou de câbles de post-contrainte...). Ou encore de réductions de charges, si nécessaire.

Comme pour l'alcali-réaction, l'eau étant un facteur essentiel à la RSI, la protection des parties d'ouvrage affectées ou à risque contre les apports externes d'eau



Les bétons d'ouvrages ayant subi une altération par RSE peuvent être réparés de façon traditionnelle par purge des parties dégradées et polluées.

est recommandée. Outre le maintien de systèmes de drainage et d'étanchéité fonctionnels, la protection des parements à l'aide de revêtements adaptés permet de lutter contre ce phénomène de gonflements internes.

Abdelkrim Ammouche
Direction technique et scientifique
Lerm Setec*

¹ Guide technique LCPC. *Recommandations pour la prévention des désordres dus à la réaction sulfatique interne*, 2017.

² Guide méthodologique LCPC. *Aide à la gestion des ouvrages atteints de réactions de gonflement interne*, 2003.

³ Guide technique LCPC. *Protection et réparation des ouvrages atteints de réactions de gonflement interne du béton - Recommandations provisoires* LCPC, 2010.

*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.

Qu'est-ce que l'ettringite ?

L'ettringite est un trisulfo-aluminat de calcium hydraté de formule chimique $3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 3CaSO_4 \cdot 32H_2O$ ou encore $Ca_6[Al(OH)_6]_2(SO_4)_3 \cdot 26H_2O$. Il fait partie des phases désignées par AFt (Al_2O_3 - Fe_2O_3 -tri) et se forme par réaction des ions sulfates SO_4^{2-} , d'origine externe ou interne, avec les aluminates du ciment. Par exemple, l'aluminat tricalcique ($3CaO \cdot Al_2O_3$ ou C_3A) constitutif du clinker Portland anhydre ou des aluminates hydratés de type AFm (Al_2O_3 - Fe_2O_3 -mono), tels que le C_4AH_{13} et le mono-sulfo-aluminat ($3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot CaSO_4 \cdot 12H_2O$). Par sa composition, la formation d'ettringite nécessite aussi la présence d'ions calcium Ca^{2+} et d'eau en quantité suffisante.

Par ailleurs, la thaumasite, de formule chimique $CaSiO_3 \cdot CaCO_3 \cdot CaSO_4 \cdot 15H_2O$, est une phase présentant des analogies avec l'ettringite et pouvant être rencontrée dans le cas d'une attaque externe par les sulfates. Elle nécessite une source de sulfates, de silice et de carbonate, et se forme à une température basse ($< 15^\circ C$).

Retrouvez la partie I
de l'article

"Les réactions sulfatiques"
dans Béton[s] le Magazine
n° 103

Novembre/Décembre 2022