

Chapitre III : L'Ettringite différée

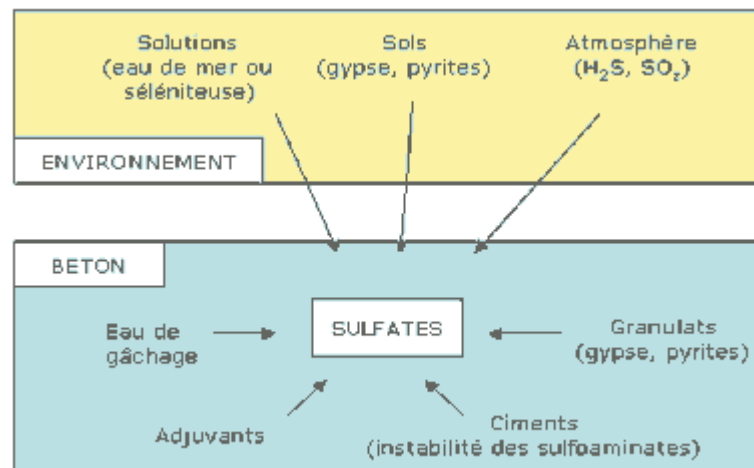
Lors des réactions des principaux minéraux de clinker (C_3S , C_2S , C_3A et C_4AF) avec l'eau, celle de C_3A est très violente (beaucoup de chaleur) et elle doit être contrôlée par un régulateur de prise généralement un gypse $CaSO_4 \cdot 2H_2O$, hémihydrate $CaSO_4 \cdot 1/2 H_2O$ ou l'anhydrite $CaSO_4$. La réaction du C_3A forme des sulfoaluminates dont la forme la plus connue est l'**ettringite** ($3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot CaSO_4 \cdot 31H_2O$) appelée aussi 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, etc.

E. Candlot (1890) a pour la première fois identifié la présence d'ettringite dans la pâte de ciment hydratée, conduisant ainsi à sa première appellation "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. Ce n'est néanmoins qu'en 1970, H.F.W Taylor détermine la structure cristalline de l'ettringite, qui est un trisulfoaluminate de calcium hydraté de formule chimique $3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 3CaSO_4 \cdot (30 \text{ à } 32)H_2O$.

Les causes de la dégradation du béton par les sulfates sont d'origine interne ou externe :

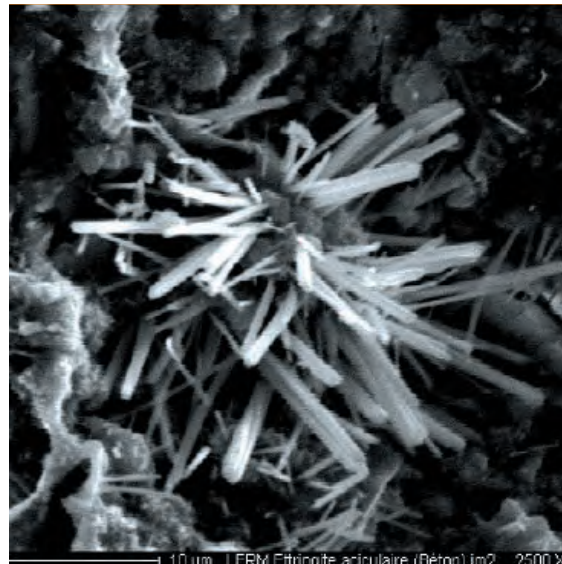


La formation de l'ettringite peut se former selon plusieurs échéances de cristallisation. On distingue trois types d'ettringite qui peuvent coexister dans un même béton. Elles se différencient essentiellement par les conditions de leur formation :

- L'ettringite de formation primaire (ou dite d'hydratation précoce) qui ne provoque pas d'expansion
- L'ettringite de formation secondaire qui peut provoquer une expansion
- L'ettringite différée (dite aussi tardive) survenue suite à une augmentation de température subie par le béton au cours de son histoire, ce cas peut provoquer une expansion.

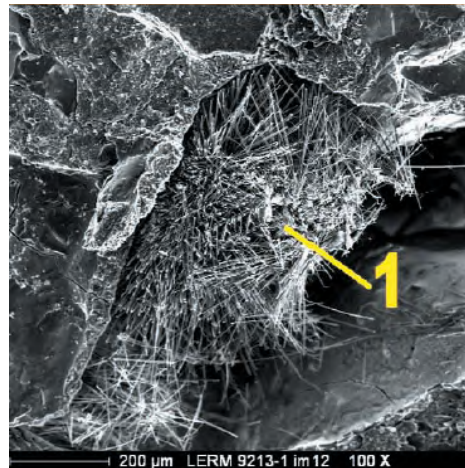
Ettringite de formation primaire : Indispensable pour réguler la prise du ciment et se formant au plus jeune âge de l'hydratation du ciment par l'action du sulfate du gypse et l'aluminate tricalcique (C_3A). Ces cristaux, de forme aciculaire, ne provoquent pas de gonflement car ils

cristallisent avant le durcissement du béton, dans les espaces libres du matériau. Ils revêtent même un caractère bénéfique, puisqu'ils contribuent à la cohésion de la pâte de ciment au jeune âge, leur formation étant accompagnée par une diminution de la porosité et par une augmentation concomitante de la résistance mécanique du mélange. Une telle formation est identifiable au MEB (microscope électronique à balayage) sous forme d'aiguilles allongées de dimensions $0,25\text{ }\mu\text{m}$ de largeur et $1\text{ }\mu\text{m}$ de longueur, comme rapporter dans la figure suivante.



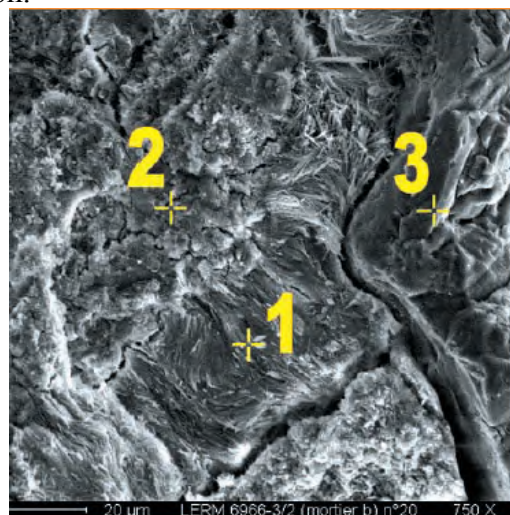
Ettringite primaire non expansive dans la pâte de ciment, vue au MEB

Ettringite de formation secondaire : correspond à une ettringite qui cristallise dans le béton durci, à la faveur de circulation d'eau dans les bétons (phénomènes de dissolution/recristallisation) et de sources de sulfates externes (sols, milieu marin...) ou internes (quantités trop importantes de sulfates dans les constituants du béton). Cette ettringite peut générer des gonflements internes pouvant conduire à l'apparition de désordres sur les ouvrages. Dans le cas des phénomènes de dissolution/recristallisation, elle cristallise sous forme aciculaire dans les espaces libres du béton (pores, fissures, interfaces pâte-granulats) à partir de la solution interstitielle ou à la faveur de percolation d'eau dans le matériau poreux ou fissuré, et ne présente généralement pas de caractère expansif. En revanche, l'ettringite de formation secondaire consécutive à un apport externe ou interne de sulfates, est susceptible de générer des gonflements internes principalement attribués aux pressions de cristallisation. Contrairement aux faciès non expansifs, cette ettringite pathologique cristallise sous une forme massive et comprimée.



Ettringite secondaire non expansive dans un pore (1), vue au MEB

Ettringite de formation différée : Cela ne peut se produire que lorsque le béton ayant subi une cure thermique à une température supérieure à 65-70°C, ou due à une forte chaleur d'hydratation ou bien un accélérateur puissant. Au-delà de ce seuil de température, l'ettringite déjà formée (ettringite primaire) se décompose tandis que la formation de nouvelle ettringite est empêchée. Les ions SO_4^{2-} sont principalement absorbés par les C-S-H dont la formation est également accélérée. Par la suite, lorsque la température du béton diminue au-dessous du seuil d'instabilité de l'ettringite, ces ions SO_4^{2-} peuvent être relâchés des C-S-H et former de l'ettringite. Mais dans ce cas, même si la formation de l'ettringite a lieu pour première fois puisqu'elle a été empêchée au cours des premières heures, l'ettringite se forme dans le milieu confiné de la matrice cimentaire durcie. Les ions SO_4^{2-} absorbés dans les C-S-H, ainsi que ceux des monosulfates présents à l'intérieur du béton, servent de source de sulfates pour la formation de l'ettringite. Ce processus nécessite la présence d'une humidité élevée et peut durer très longtemps. Lorsque la formation de l'ettringite a lieu dans un espace vacant, tel que la porosité capillaire ou des bulles d'air entraîné, l'ettringite cristallise sous forme de gros cristaux sans exercer une pression sur son entourage. Cependant, lorsque la formation de l'ettringite a lieu dans un milieu confiné, la pression de cristallisation de l'ettringite s'élève jusqu'à 350 MPa ce qui va provoquer des contraintes de traction sur son environnement. Ce phénomène provoque un gonflement interne du béton.



Ettringite expansive (1 et 2) au contact d'un granulat (3), vue au MEB



Pile de pont affectée par une réaction de gonflement due à la formation d'ettringite différée



Exemple de faïençage des parements pouvant correspondre à des désordres dus à la formation d'ettringite expansive

Les conséquences du gonflement lié à l'ettringite :

Les désordres consécutifs aux pressions de gonflement liées à la formation d'ettringite correspondent à des phénomènes de fissuration multidirectionnelle peu différents de ceux observés dans le cas des phénomènes d'alcali-réaction. Cette fissuration peut diminuer la capacité portante des ouvrages. Il convient néanmoins de souligner que dans le cas des attaques sulfatiques externes, liées à la présence d'une source de sulfates dans le milieu environnant, la dégradation s'effectue progressivement du parement vers le cœur des éléments en béton.

En revanche, dans le cas d'une formation d'ettringite liée à une source interne de sulfates (ettringite différée ou réserve excessive en sulfates dans les constituants du béton), la dégradation affecte la masse des éléments en béton (réaction de gonflement interne), conduisant ainsi à des désordres plus préoccupants et plus sévères. Enfin, les désordres sur ouvrages peuvent d'une part, apparaître au bout de quelques mois ou de quelques années en fonction du contexte environnant (apport de sulfates, conditions d'humidité, nature des ciments...). Et, d'autre part, la présence d'une fissuration en parement est susceptible d'accélérer l'apparition d'autres phénomènes pathologiques tels que la corrosion des armatures, par exemple.

Facteurs déterminants de la formation différée de l'ettringite :

Cinq facteurs sont déterminants pour le développement de la réaction :

- un apport d'humidité permanent (apport d'eau de l'extérieur ou cycle d'humidification séchage) ;
- un fort échauffement du béton pendant son durcissement ;
- une teneur élevée en alcalins dans la solution interstitielle du béton ;
- une teneur élevée en sulfates (ions de sulfates d'origine interne provenant du ciment ou autres composants, présents dans la solution interstitielle) ;
- une teneur élevée en aluminates, SO_3 / Al_2O_3 (seuil critique fixé à 0,7).

Remarque : Ces divers paramètres doivent a priori être réunis simultanément pour provoquer la formation d'ettringite différée (ou Réaction sulfatique interne RSI).

La conjonction nécessaire et indispensable des cinq facteurs limite le nombre d'ouvrages susceptibles d'être exposés au phénomène.

Diagnostic d'un ouvrage affecté par un gonflement interne

Le diagnostic d'un ouvrage affecté par un gonflement interne dépend de la gravité des désordres et notamment de l'état apparent de l'ouvrage et de la vitesse d'évolution du phénomène. Il fait appel à deux grands types de moyens d'investigation :

➤ **Le suivi in situ du gonflement de la structure et de sa fissuration dans le temps**

La caractérisation de l'état d'endommagement de l'ouvrage s'effectue à partir de l'indice de fissuration, dont la méthode d'établissement est définie dans un document intitulé LPC 47 " L'évaluation et le suivi des déformations globales de la structure, dues au gonflement, s'effectuent par des moyens adaptés en fonction de la précision souhaitée : distancemétrie par fil Invar ou infrarouge, extensométrie, etc. Un suivi concomitant de l'hygrométrie et de la température permet de corriger les résultats obtenus.

➤ **L'analyse en laboratoire d'échantillons prélevés sur l'ouvrage**

Ces analyses sont seules susceptibles de déterminer l'origine du gonflement. Le microscope électronique à balayage (MEB) est actuellement la seule technique permettant de caractériser, avec certitude, l'origine du gonflement : alcali-réaction ou/et réaction sulfatique interne (ettringite différée).

En complément, il peut être nécessaire d'effectuer des analyses complémentaires, minéralogiques et chimiques ou des examens pétrographiques.

Ces examens permettent :

- d'obtenir des informations utiles sur la formulation du béton (nature des constituants,

nature des granulats, type de ciment, dosage en ciment, teneur en alcalins, etc) ;

- de déterminer l'origine interne ou externe des sulfates.

Le diagnostic étant confirmé, des essais d'expansion résiduelle peuvent être réalisés pour estimer si le béton est encore susceptible de gonfler et dans quelles proportions. De tels essais existent pour l'alcali-réaction (méthode LCPC n° 44) et sont en cours de développement par le LCPC pour les réactions sulfatiques internes.

Nota :

Un examen visuel microscopique seul est insuffisant pour faire un diagnostic de la réaction sulfatique interne. Le diagnostic de la RSI est difficile, car l'éttringite est un minéral rencontré dans les bétons sains et qu'il peut y avoir confusion avec des désordres similaires dus à l'alcali-réaction par exemple. Il nécessite une approche globale qui doit prendre en compte les aspects microscopiques liés au béton (examens au microscope électronique à balayage, bilan minéralogique, calcul de l'histoire thermique de la pièce en béton) et les aspects macroscopiques liés à la structure. (environnement, sollicitations mécaniques).

La démarche Préventive

La démarche préventive consisterait à limiter l'incidence d'un de ces facteurs.

- **Utiliser des constituants du béton conformes aux normes** (ciment : NF EN 197-1/eau de gâchage XP P 18-303/Granulats XP P 18-545) **afin de limiter l'apport en sulfates.**

- **Limiter l'échauffement du béton au cœur de la structure**

Il existe plusieurs moyens pour limiter cet échauffement en intervenant soit au niveau de la formulation du béton, soit au niveau de sa fabrication, soit lors de la réalisation de l'ouvrage :

- en privilégiant, quand cela est possible, un ciment peu exothermique (CEM II, CEM III ou CEM V) ;
- en évitant un dosage excessif en ciment ;
- en diminuant la température des constituants du béton (arrosage des granulats, eau froide) ;
- en évitant les bétonnages en période de forte chaleur ;
- en évitant dans la mesure du possible de concevoir des pièces massives ;
- en évitant les coffrages isolants en période chaude ;
- en adaptant pour la préfabrication les cycles de traitement thermique (optimisation des différents paramètres : température et durée de la période d'attente, vitesse de montée en température, température maximale atteinte par le béton, durée du palier) ;
- en mettant en oeuvre des systèmes de refroidissement des bétons (circulation d'eau froide dans des tubes, vaporisation d'eau froide sur les coffrages).

- **Adapter la formulation du béton :**

- en choisissant des ciments à basse teneur en aluminates avec ajouts de laitier et à teneur en alcalins modérée (les experts du LCPC recommandent un seuil critique de 3 kg/m³) ;
- en utilisant des additions minérales (laitiers, cendres volantes silicoalumineuses, etc.) ;
- en évitant dans la mesure du possible les granulats siliceux de type quartz ;

- en testant la réactivité du béton par un essai de performance (projet de méthode d'essai LPC n° 59 – réactivité d'une formule béton vis-à-vis d'une réaction sulfatique interne)

• **Éviter l'apport extérieur d'eau pendant la vie de l'ouvrage :**

- en adaptant si possible la géométrie et la forme de l'ouvrage (en évitant par exemple, des zones de rétention d'eau) ;
- en prévoyant des systèmes de drainage en périphérie de l'ouvrage ;
- en mettant en œuvre des systèmes d'étanchéité adaptés.

Réparation des ouvrages

Il n'existe pas actuellement de méthodologie de traitement qui soit suffisamment efficace pour réparer durablement les ouvrages atteints de réaction de gonflement interne du béton, voire même pour arrêter l'évolution des désordres.

Le calcul des structures dégradées permet de déterminer la résistance résiduelle de l'ouvrage et de prévoir l'effet des réparations envisagées.

Les interventions possibles sur l'ouvrage malade n'ont pas toutes la même efficacité :

➤ Injection des fissures

Les réparations basées sur l'injection des fissures à l'aide de résines époxydes se sont soldées par des échecs suite à la réouverture des fissures existantes ou à l'ouverture de fissures nouvelles.

➤ Application d'une peinture

Le revêtement, de faible épaisseur (200 à 300 microns), a une efficacité quasiment nulle dans la mesure où le système est perméable à la vapeur d'eau et relativement perméable à l'eau.

➤ Mise en œuvre de revêtements d'étanchéité

La mise en œuvre d'un revêtement étanche peut apporter un résultat positif, permettant de prolonger la vie des ouvrages, à condition de faire appel à des systèmes suffisamment étanches, mis en œuvre dans des conditions satisfaisantes et susceptibles de suivre les gonflements successifs (élasticité du revêtement).

➤ Mise en œuvre d'un renfort à base d'armatures passives ou actives

Le confinement de la réaction de gonflement du béton à l'aide d'armatures passives ou actives a une action immédiate sur l'évolution des dommages mais l'efficacité à long terme d'un tel système dépend de l'évolution postérieure de la réaction.

➤ Libération des contraintes par sciage des structures

Le comportement après gonflement pouvant empirer du fait du blocage de la structure, il peut être envisagé le sciage de certains éléments afin de libérer les contraintes nuisibles à

cette dernière. Cette solution ne s'applique que dans des cas très particuliers et doit être reconduite au fur et à mesure de la poursuite de la réaction sulfatique.

➤ **Démolition et Reconstruction des ouvrages**

Dans les cas extrêmes.