

## La réaction sulfatique sur ouvrages de travaux publics et de génie civil

### 1. Le constat

Les ouvrages de travaux publics (remblais traités, VRD, routes, autoroutes, couches de structures de chaussées...), ou de génie civil (piles de ponts, barrages, plateformes bâtiments...) peuvent, aujourd'hui encore, être le siège de gonflements. La réaction sulfatique fait partie des réactions chimiques connues pouvant entraîner l'altération des caractéristiques mécaniques du matériau hydraulique constitutif de l'ouvrage concerné.

On observe alors des marqueurs distinctifs de la réaction qui sont l'apparition, à plus ou moins long terme (quelques semaines à plus de 10 ans), d'un réseau de fissuration, de gonflements, de colorations de parement, mais aussi de corrosion ou de ruptures d'armatures induites par l'entrée d'eau et d'oxygène dans l'ouvrage.

### 2. Le diagnostic

#### La réaction chimique

La réaction sulfatique peut avoir des origines diverses qui dépendent des réactifs en présence et de leur quantité, de leur provenance et concomitance, du type de matériau concerné (bétons, sols traités à la chaux, graves traitées ou non...). Elle dépend aussi des paramètres liés à l'environnement (forte humidité, zone de marnage, infiltrations ou venues d'eau,...).

La réaction a pour cause l'action des sulfates en excès sur les aluminates contenus dans la pâte de ciment en présence d'eau. Elle génère, par combinaisons ioniques, des minéraux sulfatés de type ettringite secondaire ou thaumasite qui occasionnent expansions et fissurations des ouvrages. Elle ne prend fin qu'à épuisement d'un des réactifs. Ces minéraux néoformés sont détectables et observables en analyse de laboratoire. La réaction est du type :



On différencie :

- La réaction sulfatique externe : les sulfates proviennent du milieu extérieur : sols (schistes houillers, sols marno-calcaro-gypseux), eaux souterraines séléniteuses, eaux de mer, matériaux environnants (déchets, engrais...), atmosphère. La réaction progresse du parement vers le cœur de l'ouvrage. Les ouvrages peuvent alors être réparés par piquage et purge avec la mise en œuvre d'un produit de réparation adapté.
- La réaction sulfatique interne : les sulfates proviennent de l'ouvrage lui-même (de ses constituants) : ciments, granulats (gypse, pyrite, matériaux de recyclage contenant du plâtre...). Elle affecte l'ouvrage dans sa masse et relève en général d'une cinétique plus rapide que la réaction sulfatique externe. La réparation s'avère ici plus compliquée et la principale action consistera à protéger l'ouvrage des venues d'eau. La réaction peut causer la dégradation totale de l'ouvrage.

#### La pathologie sur le matériau béton

Le béton utilisé pour des ouvrages d'art ou des ouvrages de travaux publics est plutôt concerné par la réaction de type externe, plus rarement aujourd'hui, par celle interne, sauf incident, suite à une analyse erronée sur les matériaux de constitution. On peut observer :

- une coloration de parement qui accompagne souvent la pathologie. Si le lessivage par la pluie tarde, une poudre blanche (minéraux sulfatés) est observable sur les lèvres des fissures
- un faiçage intéressant seulement la partie très superficielle du parement
- une microfissuration ou fissuration, parfois de plus d'un mètre de longueur et jusqu'à quelques millimètres d'ouverture, linéaire ou maillée. Une

fissuration de parement peut accélérer l'apparition d'autres pathologies comme la corrosion des armatures, la carbonatation accélérée (pénétration de  $\text{CO}_2$ ), ou une résistance au gel amoindrie.

Les zones les plus fréquemment concernées par la pathologie sont celles exposées aux intempéries et/ou en contact avec des terres ou sols agressifs : (parties basses de piles de pont, corniches des tabliers, piédroits, parois en retour, bassins de stations d'épuration, dallages, parties soumises à l'action des sels de déverglaçage) et les zones mécaniquement plus fragiles (angles).

#### Cas particuliers :

##### ❖ **Bétons étuvés à des températures supérieures à 65°C**

Ils subissent, aux jeunes âges, une augmentation de température importante dans la masse due à l'exo thermicité de la réaction d'hydratation. La mise en solution de sulfates déjà présents et leur remobilisation induit alors une réaction sulfatique interne avec apparition d'ettringite secondaire différée (DEF, Delayed Ettringite Formation).

##### ❖ **Ouvrages contenant des granulats pyriteux ou gypseux**

La pyrite est un sulfure de fer présent dans certains gisements naturels ou dans les sols. Son oxydation produit des oxydes de fer ferreux et ferriques et du sulfate de fer instable, se dissociant pour rentrer dans la composition de l'ettringite. Couleurs de rouilles et poussées de fer sont également observées concomitamment à la réaction sulfatique interne. Le gypse soluble, quant à lui, fournit directement des sulfates qui participent à

la formation de l'ettringite.

### **La pathologie sur les matériaux de technique routière et assimilés**

Ces matériaux, traités ou non aux liants hydrauliques, sont surtout concernés par la réaction interne. Parmi eux, on trouve les graves, les sols, les remblais... intégrés dans des ouvrages tels que les autoroutes, routes, VRD, trottoirs. On peut observer :

- Un gonflement de plusieurs centimètres de hauteur intéressant parfois une surface de plusieurs  $\text{m}^2$ .
- Une fissuration pouvant atteindre plusieurs dizaines de mètres de longueur et plusieurs centimètres d'ouverture.

#### **IMPORTANT : dommages collatéraux. Les ouvrages de bâtiment ou de génie civil situés ou implantés sur les zones sinistrées subissent les conséquences de la réaction sulfatique, ce qui augmente des coûts de sinistre déjà très importants.**

Par exemple, le gonflement d'une grave traitée polluée par du gypse induit une fissuration sur le dallage situé au-dessus. **Les recyclés sont à proscrire sous dallage.** De même, suite à une présence de gypse dans les granulats ayant servi à la réalisation de VRD ou de trottoirs, les gonflements du VRD soulèvent les bâtiments, maisons individuelles et autres structures superficielles, créant fissuration et risque d'effondrement. Enfin, le gonflement de remblais contenant des sulfates et traités à la chaux causent l'effondrement d'un mur de soutènement mitoyen.

#### Cas particuliers :

### A consulter

- La durabilité des bétons, JP Ollivier et A Vichot - Presse de l'ENPC, 2008.
- Recommandations pour la prévention des désordres dus à la réaction sulfatique interne, LCPC (IFFSTAR), 2007 \*
- Les réactions sulfatiques, conditions de formation, structure et expansion des minéraux secondaires sulfatés, A Le Roux, S Orsetti, BLPC 225, 2000
- La réactivité d'un béton vis à vis d'une réaction sulfatique interne - essai de performance, Méthode d'essai LPC N°66, LCPC IFFSTAR, 2007\*.
- Les réactions de dégradation internes du béton, Etudes et recherches des LPC, C Larive, 1992.
- Normes NF EN 12620 + A1 (granulats pour bétons)
- Norme NF EN 13242+A1 (granulats pour matériaux traités aux liants hydrauliques et matériaux non traités pour les travaux de génie civil et la construction de chaussées)
- Norme NF EN 13285 (graves non traitées - spécifications)
- Norme NF P 18545 (granulats, éléments de définition, conformité et codification)
- Norme NF EN 206-1/ CN (bétons, spécifications, performance, production et conformité - complément national à la norme EN206-1)
- Norme NF EN 197-1 (ciments, composition, spécification, critères, conformité des ciments courants)
- Fascicule de documentation FD P 18-011, (définition et classification des environnements chimiques agressifs)\*
- Norme NF EN 94-100 (essai d'aptitude au traitement d'un sol à la chaux)
- Norme NF EN 1744-1, article 10.2 (essai visant à déterminer les propriétés chimiques des granulats).\*\*

## Ce qu'il faut retenir

• Moteur de la réaction sulfatique : concomitance d'un excès de sulfates, d'aluminates de calcium et de chaux en présence d'eau. Formation de minéraux sulfatés expansifs du type ettringite.

• Avant la réalisation des travaux et de l'étude géotechnique du sol en place, consulter les fiches technique produit (FTP) du fabricant sur le matériau d'apport (essais de caractérisation, teneur en sulfates). Une vigilance supplémentaire est requise lors de l'utilisation de MIOM et de granulats recyclés.

❖ *Sols traités à la chaux*

La présence de gypse dans les sols argileux est fréquente. Le traitement à la chaux induit une « attaque chimique » des espèces argileuses. Cette réaction produit alors des aluminates de calcium à vocation liante pour le complexe traité. En présence de gypse, les équilibres chimiques sont déplacés et les sulfates disponibles réagissent avec les aluminates formés pour donner des espèces minérales non liantes de type ettringite. L'eau étant le moteur de la réaction, une arrivée d'eau abondante (pluie, excès d'eau de gâchage) sert de déclencheur à la réaction chimique et peut conduire dans certains cas à des sinistres de grande ampleur.

❖ *Ouvrages réalisés avec granulats de recyclage*

Pour des bétons recyclés ou des matériaux recyclés traités aux liants hydrauliques, les mécanismes réactionnels sont identiques à ceux explicités précédemment. La réaction procède relativement à la présence de plâtre (soluble) issu d'un tri non maîtrisé des matériaux de démolition ou de déconstruction.

**IMPORTANT :** la réaction sulfatique peut intervenir dans une grave non traitée, les aluminates nécessaires à la réaction provenant alors de la gangue de ciment qui entoure les granulats de recyclage (granulats issus d'un béton originel concassé).

❖ *Ouvrages contenant des MIOM*

L'utilisation de Mâchefer d'Incinération d'Ordures Ménagères pouvant potentiellement contenir une quantité importante de sulfures, de sulfates et d'aluminates, peut s'avérer problématique quand le lot n'a pas été aéré (lessivage)

et n'a pas subi de maturation suffisante.

3. Comment réduire les  
risques : bonnes pratiques et  
conseils de prévention

En fonction du contexte :

1. Avant toute réalisation de couche de forme ou de liaison ou de tout traitement de sol ou de remblai en place, les entreprises doivent se procurer les études géotechniques ou les rapports d'analyses physico-chimique du sol qui mettraient en évidence la présence de sulfates (gypse, pyrite, anhydrite...) et les analyser pour valider la solution retenue.
2. Il est nécessaire de préciser dans la commande de matériau(x), le caractère OBLIGATOIREMENT inerte du matériau d'apport (granulat, mâchefer). Les bons réflexes consistent en outre à :
  - Obtenir et consulter la FTP (Fiche Technique Produit) du fournisseur et à lui demander son plan d'assurance qualité (PAQ).
  - Vérifier si les essais de caractérisation des matériaux sont effectivement réalisés. En particulier, les teneurs en sulfates et sulfures sont à analyser avec attention. Se référer aux normes existantes.
  - Mettre en œuvre des matériaux correspondant aux exigences des CCTP en n'omettant pas le devoir de conseil en cas de doute.
  - Conserver la traçabilité des achats de matériaux et de tout document (CCTP, rapport d'essais) afin de préserver ses recours en cas de sinistre.
  - Faire procéder à des essais contradictoires, suivant l'importance du

chantier. Les essais de recherche des sulfates sont simples à réaliser, avec un investissement minime (voir\*\* rubrique à consulter).

- Utiliser des produits marqués CE et bénéficiant si possible d'une certification NF.

3. Le maître d'ouvrage ou le maître d'œuvre doivent être alertés par l'entreprise sur une absence éventuelle de drainage, sur une venue d'eau intempestive (fuite) ou sur la présence d'une nappe phréatique non répertoriée. Dans le même sens, lors de la mise en œuvre, ne pas procéder à des ajouts d'eau intempestifs.

4. L'entreprise doit faire valider la composition du ciment demandé dans le CCTP. En effet, de la classe d'environnement (ou d'exposition) du milieu (agressivité) dans lequel l'ouvrage sera implanté découlera la composition du ciment à utiliser.

5. Dans le cas de chantiers prestigieux ou importants avec bétons, demander

au maître d'ouvrage, la réalisation d'un essai de performance afin d'estimer le risque d'expansion. Des niveaux de prévention et des précautions associées sont déterminables en fonction de la catégorie de l'ouvrage et de la classe d'exposition de l'ouvrage (voir\* rubrique à consulter). Vérifier la teneur en aluminates (< 5 à 7 % conseillée selon le retour d'expérience) et en alcalins du ciment utilisé. Il existe, le cas échéant, des liants routiers et des ciments à faible teneur en aluminates (PM-ES, ciment au laitier ou aux cendres volantes) qui limitent les phénomènes de gonflement.

6. Si cela est possible et si les conditions du marché le permettent, l'entreprise doit éviter, en accord avec la maîtrise d'ouvrage ou maîtrise d'œuvre, la réalisation de pièces massives en béton afin de maîtriser la température d'hydratation.

## Ce qu'il faut retenir

- Connaître avec précision la classe d'exposition (agressivité du milieu) dans lequel l'ouvrage sera implanté (analyse physico-chimique).

- Conserver tout document (FTP, CCTP, commandes, rapport d'essais) permettant de préserver ses recours en cas de sinistre.