

Dégradation de dalles de tablier de ponts en Belgique

Étude d'une pathologie complexe

RÉSUMÉ

L'analyse des bétons du tablier d'un pont du Sud de la Belgique (Bastogne) a permis de mettre en évidence les causes de la dégradation par délamination. Plusieurs produits de réactions secondaires sont observés : gel de réactions alcalis-granulats, ettringite secondaire et chloroaluminate de calcium. Les causes probables de la dégradation sont les défauts d'étanchéité, l'apport de sels de déverglaçage, la présence de granulats réactifs.

Les grès phylladeux de Bastogne sont reconnus pour la première fois dans un processus de réaction silico-alcaline. La formation de cristaux de chloroaluminate de calcium *in situ* est clairement observée.

MOTS CLÉS : 53 - 32 - 60 - Tablier de pont - Belgique - Dégradation - Dalle - Béton hydraulique - Sulfate - Aluminate - Calcium - Alkali-réaction - Ettringite.

Philippe DEMARS

Ingénieur en Chef, Directeur des Ponts et Chaussées

Pierre GILLES

Ingénieur des Ponts et Chaussées

Éric DONDONNÉ

Ingénieur industriel

Ministère Wallon de l'Équipement et des Transports

Robert DEGEIMBRE

Ingénieur civil, Professeur

Anne DARIMONT

Géologue, Chef de travaux

Université de Liège – Laboratoire des Matériaux de construction

Gabriel LORENZI

Géologue, Responsable de recherches

Institut Scientifique de Services Publics

Albert MERTENS DE WILMARS

Directeur du Laboratoire de Génie Civil

Université Catholique de Louvain

Introduction

Depuis 1985, une nouvelle forme de dégradation du béton est apparue sur certains ponts en Belgique. Jusqu'à présent, elle ne semble concerner que les ponts à poutres. Dans ce type d'ouvrage dont les poutres sont en béton armé ou en béton précontraint, l'épaisseur de la dalle est classiquement de 18 cm. Ces dalles sont normalement protégées par une chape d'étanchéité (asphalte coulé ou membranes préfabriquées et, depuis peu, résines).

Cette étanchéité est recouverte d'une chape de protection, soit en asphalte coulé, soit en enrobé compacté, ou plus rarement en mortier de ciment, le tout étant recouvert de béton hydrocarboné.

Nous avons baptisé ces dégradations « pourrissement des dalles de tablier de ponts ».

Le premier cas a été constaté en 1985. En 1995, une relation est établie entre les dégradations de la dalle en face supérieure et des taches en face inférieure. Fin 2000, 41 cas sont recensés (fig. 1). Le processus qui, à terme, conduit au percement (fig. 2) du tablier, peut présenter différentes formes. Il progresse généralement du haut vers

Nombre d'ouvrages

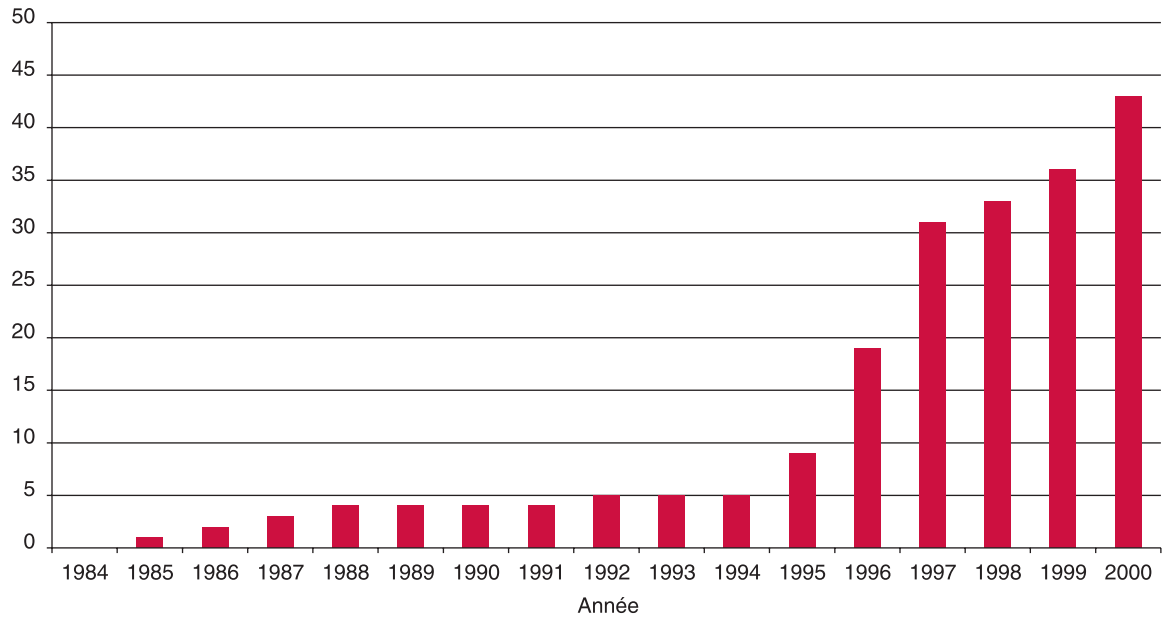


Fig. 1 - Évolution du nombre de cas de pourrissement de dalles de tabliers de ponts recensés en Wallonie – État en décembre 2000.



Fig. 2 - Viaduc autoroutier : formation d'un trou dans le tablier au droit d'un joint de dilatation.

le bas de la dalle, mais la présence d'une prédalle peut modifier cette progression.

Les différentes formes de dégradation peuvent être décrites comme suit (fig. 3) :

➤ désagrégation du béton en face supérieure, parfois à l'interface dalle/prédalle, et plus rarement en face inférieure du tablier : seul subsiste le squelette granulaire (fig. 4). Des armatures obser-

vées dans ces zones peuvent être caractérisées par un aspect brillant qui semble résulter de l'abrasion par les grains libérés ; des traces de « morsures » par corrosion y sont parfois constatées ;

➤ délamination du béton (fig. 5) : le béton se dégrade en feuillets de quelques millimètres d'épaisseur, essentiellement en face supérieure de la dalle [8, 9] ;

Fig. 3 - Schéma des différentes formes de dégradations rencontrées dans les cas de pourrissement de dalles de tabliers.

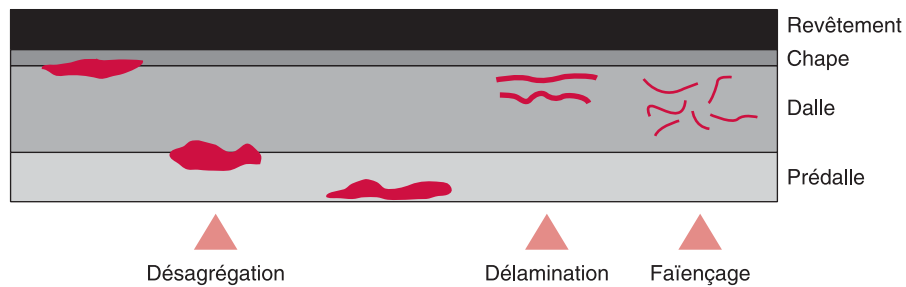


Fig. 4 - Pont routier : formation d'un trou dans le tablier au droit d'une dalle souple. Autour du trou, le béton est réduit à son squelette granulaire.



Fig. 5 - Carotte Ø 50 mm prélevée dans un tablier d'un pont autoroutier. La délamination du béton, ainsi que sa désagrégation sont visibles en partie supérieure de la carotte.

➤ micro-fissuration multidirectionnelle du béton qui affecte toute l'épaisseur de la dalle, ce cas est toutefois rarement rencontré.

Ces défauts s'accompagnent très souvent de la présence en face inférieure du tablier, de taches grises plus ou moins foncées, persistantes quelles que soient les conditions d'humidité (fig. 6).

Deux autres signes indicateurs de la présence possible du phénomène sont, la remontée de fines particules de ciment au travers du revêtement (fig. 7), et la formation de nids de poule dans le revêtement. La réparation de ces nids de poule n'est jamais durable.

Dans le cadre de ses missions d'expertise, la Direction de l'Expertise des Structures du Ministère wallon de l'Équipement et des Transports (D.424), a pu mettre en évidence la relation entre ce pourrissement et des défauts d'étanchéité. De plus, des teneurs en chlorures fortement élevées (0,06 à 1 % voire plus, par rapport à la masse de béton) ont été constatées systématiquement dans les zones dégradées. Les différentes investiga-

tions réalisées indiquent également la présence de plusieurs réactions secondaires.

Devant la complexité de cette forme de dégradation, le danger qu'elle implique pour les usagers de la route et l'évolution croissante du nombre d'ouvrages atteints, il a été décidé de mener une recherche approfondie avec la participation du Laboratoire des Matériaux de Construction de l'Université de Liège (LMC), du Laboratoire du Génie Civil de l'Université catholique de Louvain (LGC), de l'Institut Scientifique de Service Public (ISSeP), du Laboratoire de Recherche de l'Industrie Cimentière (CRIC) et de la Fédération de l'Industrie Cimentière Belge (FEBELCEM).

Cette recherche, outre une étude approfondie des essais déjà réalisés sur les ouvrages atteints, a permis d'examiner un ouvrage particulier : le pont de Neufchâteau à Bastogne (fig. 8). Une des raisons de ce choix réside dans le caractère supposé non-réactif du granulat vis-à-vis des alcalis. Il s'agit d'un ouvrage isostatique, légèrement biais, à double tablier de trois travées. Le tablier de chaque tra-



Fig. 6 - Vue de la face inférieure du tablier d'un pont autoroutier. Présence de taches foncées et persistantes malgré les conditions climatiques.



Fig. 7 - Vue du revêtement d'un pont autoroutier. De fines particules de ciment sont visibles. Elles proviennent du béton du tablier qui se dégrade et remontent au travers du revêtement asphaltique.



Fig. 8 - Vue générale du pont de Neufchâteau à Bastogne.

vée est constitué de poutres préfabriquées en béton précontraint. La longueur totale de l'ouvrage est de 51,6 mètres, sa largeur de 28,3 mètres.

Prélèvements

Seize zones de prélèvements ont été choisies en partie dans des zones avec taches et en partie dans des zones sans taches considérées, *a priori*, comme saines.

Trois carottes de 50 mm de diamètre et deux de 80 mm ont été prélevées dans chaque zone.

La structure de la dalle de tablier est la suivante, de haut en bas :

- > couche de roulement en enrobé hydrocarboné : environ 6 cm d'épaisseur ;
- > chape de protection asphaltique : environ 4 cm d'épaisseur ;
- > chape d'étanchéité en asphalte coulé : environ 2 cm d'épaisseur ;
- > dalle de béton armé : de 12 à 16 cm d'épaisseur ;
- > prédalle en béton armé : 6 cm d'épaisseur.

L'observation macroscopique des prélèvements a mis en évidence les caractéristiques suivantes :

- > pas d'adhérence entre la dalle de béton et l'étanchéité (54 cas sur 70). L'interface discontinu peut être souligné par un dépôt blanc ;
- > présence de plans de rupture en feuillets dans 9 zones sur 16, souvent accompagnés de précipitations blanches. La délamination est observée entre 2 et 35 mm sous la face supérieure de la dalle. D'autres plans de rupture sont rencontrés vers ± 50 , ± 80 , ± 120 mm, souvent associés à la présence d'armatures ;

- > hétérogénéité de teinte de la pâte de ciment du béton de dalle ;
- > présence de granulats dans le béton de la dalle présentant un double liseré de teintes blanche et noire ;
- > adhérence généralisée du béton de dalle au béton de prédalle ;
- > granulats de grès et phyllades dans le béton de dalle et de quartz roulés dans le béton de prédalle. Le béton de la prédalle apparaît sain à l'œil nu.

Essais

Les essais réalisés vont permettre de distinguer les zones réellement saines et les zones réellement dégradées. On verra que les zones sans taches ne sont pas nécessairement saines.

Les essais chimiques, physiques et mécaniques réalisés sont les suivants : profondeur de carbonatation, teneur en ciment, teneur en sulfates, teneur en Cl^- , teneur en $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$, absorption d'eau par immersion, absorption d'eau sous vide, facteur de saturation, absorption capillaire, résistance à la traction directe (cohésion), masse volumique, résistance à la compression, perméabilité sous pression, examen pétrographique et observations en microscopie électronique.

Résultats des essais

Essais chimiques

La profondeur de carbonatation, en face inférieure du tablier est pratiquement nulle.

Les teneurs en ciment (NBN B15-250) sont proches de 350 kg/m³. Il s'agit vraisemblablement de ciment Portland (CEM I), légèrement additionné de laitier.

Le tableau I précise les concentrations en sulfates. Elles ont été mesurées (NBN B15-256) dans la dalle à trois niveaux (haut, milieu, bas) et dans la prédalle. Elles varient de 0,37 à 0,61 % par rapport à la masse de béton (21 analyses). La teneur est légèrement plus importante dans la prédalle (0,6 %) que dans la dalle (0,46 %).

Il n'y a pas de différence significative de la teneur en sulfates entre les échantillons prélevés dans les zones avec taches et dans celles sans taches.

Le tableau I précise les concentrations en chlorures (NBN B15-257 et NBN T61-201). Elles peuvent atteindre 0,53 % par rapport à la masse de béton (51 analyses) :

La tendance générale est une décroissance de la teneur vers le bas ;

- dans le haut de la dalle, 11 valeurs sur 17 sont supérieures à 0,1 % ;
- dans le milieu de la dalle, 3 valeurs sur 11 sont supérieures à 0,1 % ;
- dans la partie inférieure de la dalle, 3 valeurs sur 17 sont supérieures à 0,1 % ;
- dans la prédalle, la teneur en Cl⁻ est très faible (< 0,01 %).

Les teneurs en Na et K (absorption atomique après attaque acide à chaud du béton broyé – HNO₃ 1.41

molaire, dilué 1 + 2) permettent de calculer les teneurs en Na₂O équivalent (Na₂O équivalent = % Na₂O + 0,658 % K₂O).

Le tableau II précise, pour cinq échantillons, les teneurs en Na₂O, K₂O, Na₂O équivalent et chlorures.

Dans le béton, les teneurs en Na₂O varient de 0,05 à 0,18 % ; les teneurs en K₂O varient de 0,15 à 0,27 % ; les teneurs en Na₂Oeq varient de 0,19 à 0,28 % par rapport à la masse de béton.

En négligeant tout apport en alcalins par les granulats, les teneurs en Na₂O et K₂O du ciment peuvent être estimées par calcul. Sur base d'une teneur en ciment de 350 kg/m³ et d'une masse volumique de 2 300 kg/m³, les teneurs varient de 0,3 à 1,2 % en Na₂O et de 1 à 1,7 % en K₂O.

La teneur en K₂O est pratiquement la même partout dans l'épaisseur de la dalle, alors que la teneur en Na₂O est plus élevée dans la partie supérieure. Les zones riches en Na₂O sont également riches en Cl⁻. Les teneurs en Na₂O et K₂O sont plus élevées que celles caractéristiques des ciments actuels.

Essais physiques et mécaniques

Ces essais ne concernent pas la prédalle.

L'absorption d'eau par immersion (NBN B15-215) varie entre 6,4 et 8 %. L'absorption d'eau sous vide (NBN B24-213) varie entre 7 et 9 %. Le calcul du facteur de saturation révèle le caractère gélif du matériau.

TABLEAU I

	Sulfates (%)*			Chlorures (%)*		
	min.	max.	moy.	min.	max.	moy.
Haut de la dalle (h)	0,37	0,50	0,45	0,050	0,382	0,131
Milieu de la dalle (m)	0,45	0,49	0,47	0,008	0,400	0,190
Bas de la dalle (b)	0,39	0,54	0,48	0,002	0,530	0,109
Prédalle	0,59	0,61	0,60	nd.	0,006	0,003

TABLEAU II

Échantillons	Na ₂ O (%)*	K ₂ O (%)*	Na ₂ O éq. (%)*	Na ₂ O éq. (kg/m ³)	Cl ⁻ (%)*
Dalle haut 1	0,182	0,146	0,278	6,39	0,382
Dalle haut 2	0,150	0,196	0,279	6,42	0,135
Dalle haut 3	0,086	0,265	0,260	5,99	0,053
Dalle bas 1	0,050	0,253	0,216	4,97	0,004
Dalle bas 2	0,076	0,172	0,189	4,35	0,014

* Valeurs exprimées en % de la masse de béton.

Le coefficient de saturation (eau absorbée par unité de surface en fonction du temps) obtenu par absorption d'eau capillaire (prEN 13057) est de 1 à $1,6 \text{ mm}^3/\text{mm}^2/\text{h}^{0,5}$.

Des essais de traction directe (NBN B15-211) ont été réalisés dans la partie supérieure de la dalle en dehors des zones délitées où la cohésion est nulle. La résistance à la traction directe (cohésion) varie de 1,3 à 4,1 Mpa.

Les plans de rupture se forment à quelques dizaines de millimètres de la surface supérieure (10 à 50 mm), avec déchaussements des granulats. Quelques surfaces montrent la présence de taches blanches.

Les essais de perméabilité ont été réalisés au moyen d'un perméamètre à niveau constant (circuit fermé ou ouvert), avec de l'eau déminéralisée sur des éprouvettes sans armature. Les valeurs de coefficient de perméabilité sont faibles : 1 à $30 \cdot 10^{-11} \text{ m/s}$. La perméabilité du revêtement dans le béton hydrocarboné est nettement plus importante (1 à $5 \cdot 10^{-5} \text{ m/s}$).

L'essai de perméabilité effectué sur du béton hydrocarboné avec une solution saline a mis en évidence l'apparition de « cloques » et de fissures horizontales dans le revêtement résultant d'une réaction de gonflement entre les constituants minéraux de l'enrobé et la solution saline.

Les résistances en compression (NBN B15-220) mesurées sur éprouvettes de 50 mm de diamètre et 44 mm de hauteur et provenant de zones avec et sans taches, varient de 22 à 31 MPa, avec des masses volumiques de 2,2 à 2,3 g/cm^3 .

Examen microscopique

L'analyse pétrographique sur lames minces des carottes de béton provenant des zones dites « saines » (sans taches), comme des zones dites « dégradées » (avec taches), met en évidence les caractéristiques suivantes :

- > ciment portland avec des grains de clinker non hydratés relativement nombreux et du laitier ;
- > granulats grossiers constitués de grès, quartzites, siltites et quelques schistes du Dévonien inférieur appelés « grès de Bastogne » [2] ;
- > sable concassé de grès de même nature que les granulats grossiers ;
- > porosité constituée de rares bulles d'air (parfois tapissées d'ettringite secondaire), de fissures et d'une capillarité souvent hétérogène ;
- > réactions alcalis-silice (RAS) associées aux granulats et aux sables (fig. 9) plus développées dans la partie supérieure de la dalle (< 10 cm) ;

> microfissures subparallèles à la surface de la dalle visibles sur *bloc poli* (fig. 10).

En microscopie électronique à balayage avec EDS, des plages présentant des anomalies visibles à l'œil nu (dépôts généralement blancs) sont observées (échantillons provenant de feuilletages du béton).

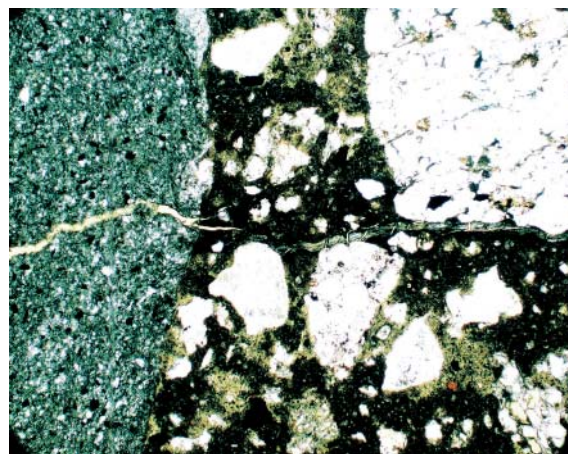
Le béton de la dalle est caractérisé par la présence de précipitations secondaires : des gels de réactions alcalis-granulats, de l'ettringite secondaire bien cristallisée (fig. 11) omniprésente [4, 5], une thaumasite plus rare et du chloroaluminate de calcium.

Le gel de réactions alcalis-granulats [3] présente différentes formes : lisse (fig. 12), en rosettes (fig. 13), ou alvéolaire (fig. 14). Le gel est caractérisé par la présence de Ca et K. Les rosettes riches en K sont observées en bordure du granulat ; le gel lisse est observé en couronne du gel en rosettes.

Au côté du gel de réactions alcalis-granulats (Si, Ca) un minéral idiomorphe de grande taille (> 10 μm) (fig. 15), dont le spectre montre la présence de Cl, Al et Ca, est mis en évidence.

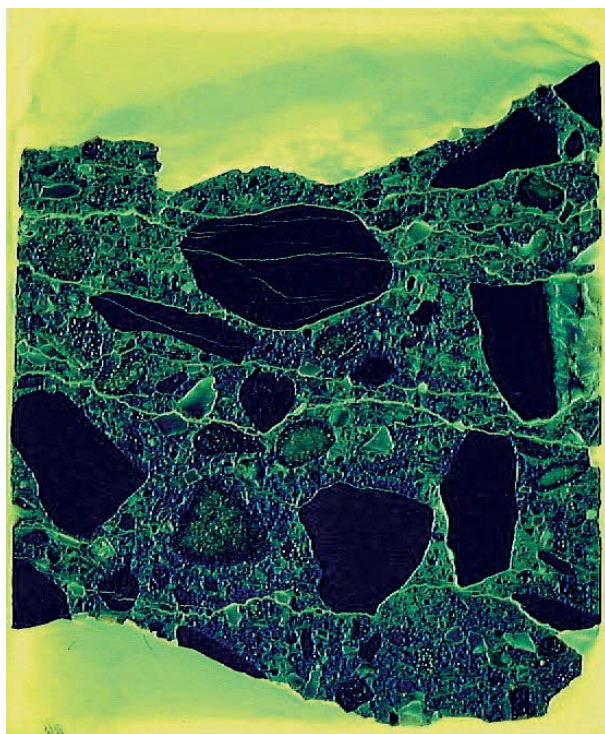
Ce chloroaluminate de calcium se rencontre généralement dans les discontinuités de la face supérieure de la dalle, mais aussi à proximité de l'interface dalle/prédalle.

Le chloroaluminate de calcium, identifié par diffraction des rayons X en caméra Debye-Scherrer et en utilisant la radiation Cu filtrée au Ni, présente la formule $\beta - \text{Ca}_4\text{Al}_2\text{O}_6\text{Cl}_2 \cdot 10 \text{H}_2\text{O}$.



Microscopie pétrographique, lumière normale.
Taille de la plage : 2,8 x 2,4 mm.

Fig. 9 - Réaction alcalis-silice dans laquelle intervient un granulat de siltite légèrement métamorphique (à gauche) : ce dernier est fissuré. La fissure qui se prolonge dans la pâte de ciment contient du gel alcalis-silice.



Taille de la plage : 5 × 6 cm.
Lumière fluorescente.

Fig. 10 - Section polie dans une carotte imprégnée de résine fluorescente. Un réseau de fissures parallèles à la surface externe du béton est observé.

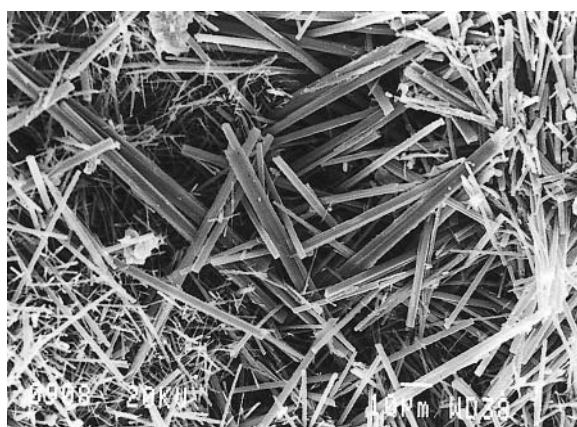


Fig. 11a - Vue au microscope électronique à balayage d'ettringite secondaire.

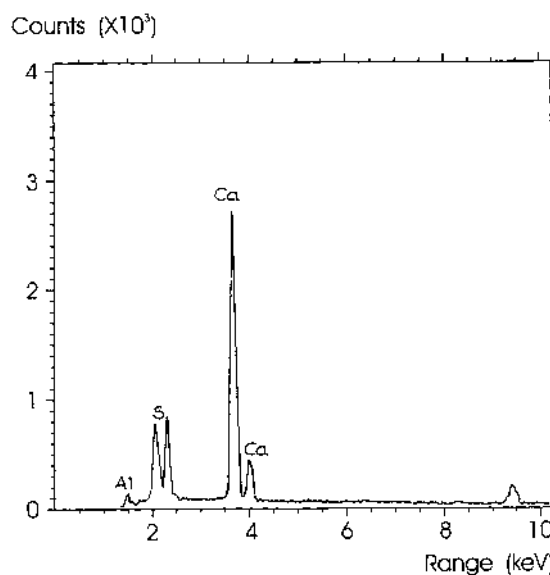


Fig. 11b - Spectre EDS de l'ettringite secondaire de la figure 11a. ▶

Conclusion

L'étude du béton de la dalle de tablier du pont de Neufchâteau à Bastogne a permis de mettre en évidence que les observations macroscopiques, telles que des taches en face inférieure du tablier ainsi que des nids de poule et remontées de fines dans le revêtement hydrocarboné, sont des signes de dégradations conduisant à des délaminations et désagrégations du béton.

L'ensemble des résultats suggère que les causes potentielles des altérations sont les suivantes :

- déficience du système d'étanchéité du tablier et forte porosité du béton ;
- présence de granulats sensibles aux alcalins impliqués dans de nombreuses réactions alcalis-silice ;
- apport en chlorure de sodium et/ou calcium par les sels de déneigement ;
- présence d'autres réactions secondaires sulfatique et chlorurée.

Les produits de ces réactions : gel de réactions alcalis-silice, ettringite et chloroaluminat de calcium peuvent présenter un caractère gonflant.

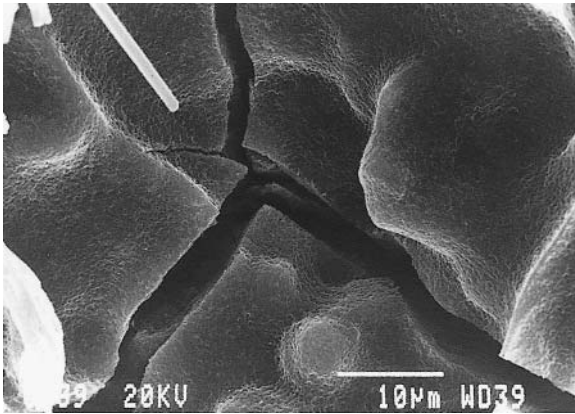


Fig. 12a - Vue au microscope électronique à balayage du gel de silice sous forme lisse.

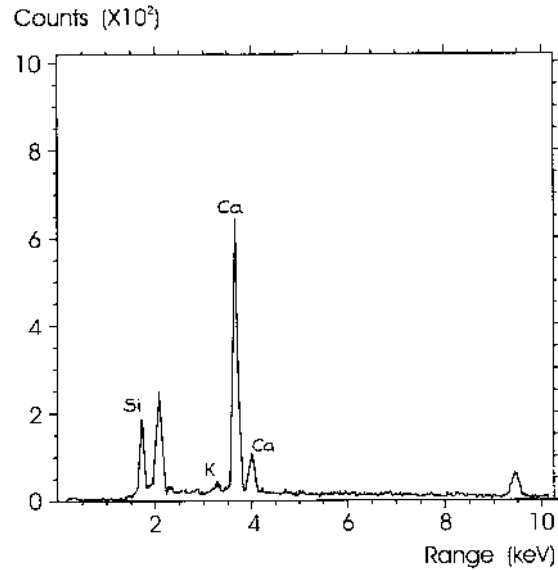


Fig. 12b - Spectre EDS du gel de silice de la figure 12a. ▶

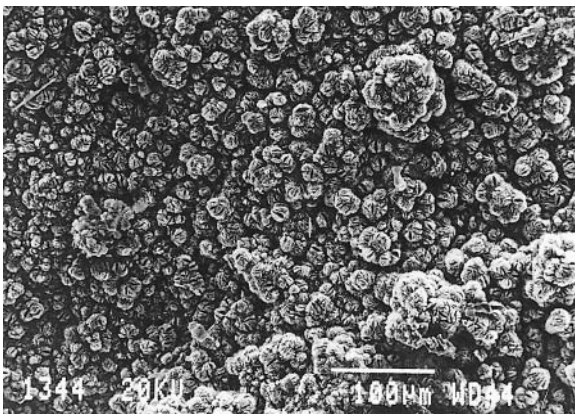


Fig. 13a - Vue au microscope électronique à balayage du gel de silice sous forme de rosettes.

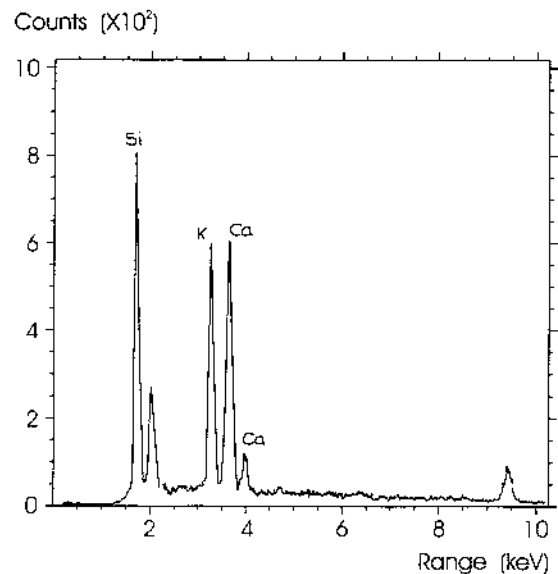


Fig. 13b - Spectre EDS du gel de silice de la figure 13a. ▶

Cette constatation pourrait, en tout ou en partie, expliquer les dégradations observées. Toutefois, lorsque l'ettringite et les chloroaluminates de calcium sont idiomorphes, ils ont pu se développer dans des fissures ouvertes ou des pores ; ils ne présentent dès lors pas de caractère fissurant.

Si le chloroaluminate de calcium a été synthétisé en laboratoire [1, 6, 7], il est mis en évidence pour la première fois dans un ouvrage d'art en Belgique.

D'autres investigations complémentaires sont actuellement menées pour corroborer les résultats présentés, qui ne concernent qu'un seul pont, et pour tenter de mieux définir la chronologie des pathologies et l'importance relative de chacune d'entre elles.

Il apparaît d'ores et déjà que les signes extérieurs de dégradations constituent des indicateurs précieux de l'altération du béton de la dalle, mais qu'ils sont insuffisants (les zones à taches sont toujours dégradées, mais il existe des dégradations dans les zones sans taches). Ils doivent susciter des investigations complémentaires. Dans ce cadre, la direction de l'Expertise des Structures du MET recherche des techniques d'investigation in situ devant lui permettre une localisation non équivoque des zones altérées.

Enfin, l'importance de la qualité de la mise en œuvre, tant au niveau du béton, qu'au niveau de la performance de l'étanchéité est clairement démontrée. Il en est de même pour l'inspection et l'entretien.

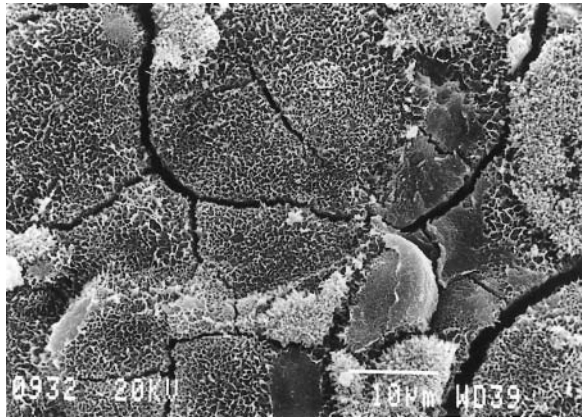


Fig. 14a - Vue au microscope électronique à balayage du gel de silice sous forme alvéolaire.

Fig. 14b - Spectre EDS du gel de silice de la figure 14a. ▶

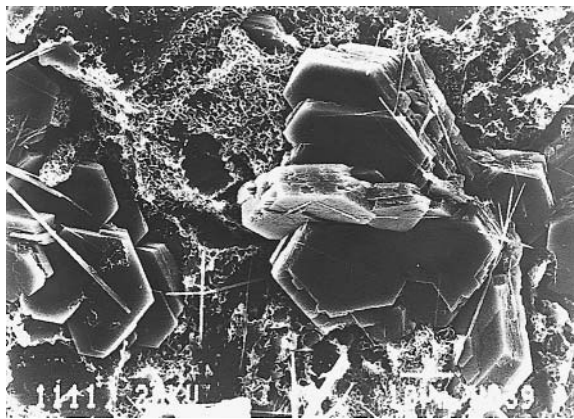
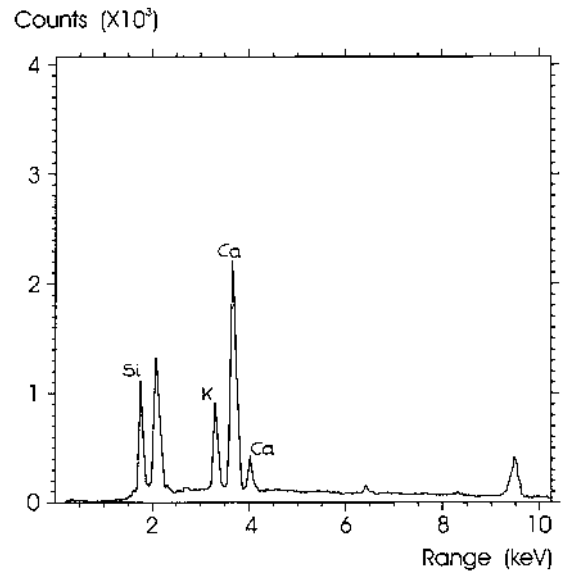
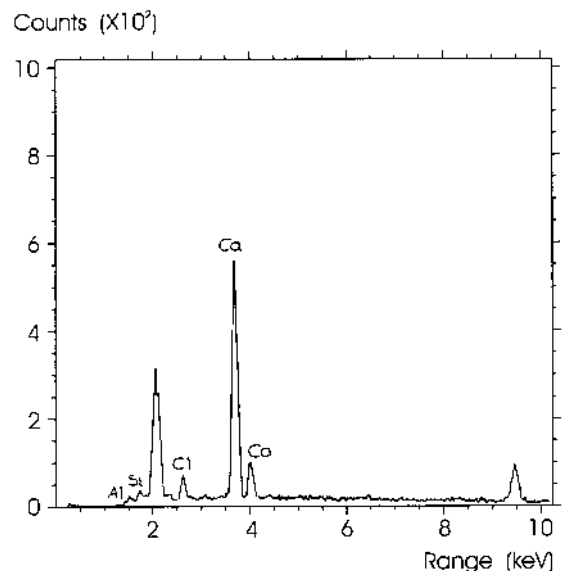


Fig. 15a - Vue au microscope électronique à balayage de cristaux de chloroaluminate de calcium.

Fig. 15b - Spectre EDS du chloroaluminate de calcium de la figure 15a. ▶



RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] BERUBE M.A., DORION J.-F. (2000), *Laboratory and field investigations of the influence of sodium chloride on alkali-silica reactivity*, 11^e Conférence Internationale sur les réactions Alcalis – Granulats, Québec 2000, pp. 149-158.
- [2] DINGELSTADT C., THOREZ J. (1998), *Atlas pétrographique des principales roches détritiques siliceuses utilisées dans les monuments en Wallonie*, Direction Générale de l'Aménagement du Territoire, du logement et du Patrimoine (DGATLP), Liège, Belgique, 158 pages.
- [3] STIEVENARD D. (1987), Étude de la réaction alcalis-silice dans les bétons, *Rapport de recherche LPC*, **144**, 104 pages.
- [4] LOUARN N., LARIVE C. (1993), Alkali-réaction et réaction sulfatique : Synthèse des études microscopiques d'expertises de ponts dégradés, *Bulletin de Liaison des laboratoires des Ponts et Chaussées*, **184**, mars-avril, pp. 57-69.
- [5] DIVET L. (2000), État des connaissances sur les causes possibles des réactions sulfatiques internes au béton, *Bulletin des laboratoires des Ponts et Chaussées*, **227**, juillet-août, pp. 71-84.
- [6] FIGG J.W. (1979), Chemical attack on hardened concrete effects of sulfates and chlorides, *Bulletin of the Institution of corrosion science and technology*, **75**, july 1979, pp. 12-23.

- [7] MORICONI S. and *al.* (1989), Damage of concrete by exposure to calcium chloride, *Materials Engineering*, Vol. 1, 2, pp. 491-496.
- [8] SUPRENANT B.A., MALISCH W.R. (1998), *Diagnosing slab delaminations, Is improper finishing the only cause ?* Concrete Construction, January, pp. 29-35.
- [9] SUPRENANT B.A., MALISCH W.R. (1998), *Diagnosing slab delaminations, Thee role of top-down stiffening*, Concrete Construction, March, pp. 277-283.

ABSTRACT

Deterioration of deck slabs on Belgian bridges: Study of a complex dysfunction survey

Ph. DESMARS, E. DONDONNE, P. GILLES, A. DARIMONT, R. DEGEIMBRE, G. LORENZI, A. MERTENS de WILMARS

An analysis of the deck's concrete of one of Southern Belgium's bridges (in Bastogne) made it obvious that delamination involves slab deterioration. A number of products issued from secondary reactions have been observed: alkali-silica gel, secondary ettringite and calcium chloroaluminate. Probable causes of this deterioration include failures of the waterproofing, the addition of deicing salts, the presence of reactive aggregates and a sulphating process.

The phylloidal sandstones of the Bastogne region have been acknowledged for the first time in an alkali-silicate reaction process. The *in situ* formation of calcium chloroaluminate crystals has also been clearly observed.