

# Réalcalinisation du béton carbonaté par migration des alcalins

**Anne DARIMONT \***  
**Robert DEGEIMBRE**

*Laboratoire des matériaux de construction (LMC),  
université de Liège*

**Pierre GILLES**  
**Éric DONDONNE**  
**Philippe DEMARS**

*Direction de l'expertise des structures – ministère  
de l'Équipement et des Transports de la région  
Wallonne (Belgique)*

**Albert MERTENS de WILMARS**  
*Laboratoire du génie civil (LGC),  
université catholique de Louvain*

**Gabriel LORENZI**  
*Institut scientifique de service public (ISSeP)*

**Guy LEFEBVRE**  
*Direction des structures routières – ministère de  
l'Équipement et des Transports de la région Wallonne  
(Belgique).*

## ■ RÉSUMÉ

En Belgique, certaines dalles de tabliers de ponts à poutres présentent depuis quelques années des dégradations importantes (délamination, désagrégation, etc.) pouvant conduire à terme au percement de la dalle. Cette forme de dégradation, dénommée « pourrissement du béton des dalles de tabliers de ponts » n'est pas répartie uniformément sur la surface d'un tablier : des zones dégradées sont ainsi mises en évidence par rapport à des zones saines. Les zones dégradées sont souvent associées à la présence de taches sombres. Dans certaines de ces taches en face inférieure, il arrive que la couche de béton antérieurement carbonatée présente à nouveau un pH supérieur à 8,3. Il est montré que cette anomalie peut être attribuée à une migration des alcalins à travers la dalle en béton vers la face inférieure de celle-ci, provoquant une réalcalinisation de la couche carbonatée et par conséquent une remontée du pH.

## Re-alkalinization of carbonated concrete by means of alkaline migration

### ■ ABSTRACT

*In Belgium, a number of girder bridge deck slabs have over the past several years been displaying major degradations (delamination, disaggregation, etc.) capable, in time, of leading to slab perforation. This form of degradation, called "rotting of bridge deck slab concrete" is not uniformly distributed over the deck surface: deteriorated zones can be distinguished from intact zones and moreover are often associated with the presence of dark spots. On the lower surface of some such spots, the previously-carbonated concrete layer can sometimes once again display a pH of above 8.3. It will also be demonstrated that this anomaly may be attributed to a migration of alkaline through the concrete slab towards the lower surface, thereby causing a re-alkalinization of the carbonated layer and hence a rise in pH.*

\* AUTEUR À CONTACTER :

**Anne DARIMONT**  
anne.darimont@ulg.ac.be

## INTRODUCTION

La présence de portlandite ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) dans la pâte de ciment est responsable du caractère fortement basique du béton. Cette caractéristique garantit la passivation des armatures car, pour un pH supérieur à 9 et en l'absence de chlorures, l'oxydation de l'acier induit la formation d'un oxyde ferrique stable et protecteur à la surface des armatures, qui empêche la poursuite de la réaction d'oxydation. En dessous de cette valeur de pH, c'est un oxyde ferreux non protecteur qui se forme et l'oxydation se poursuit en corrosion de l'acier [1].

Le test à la phénolphthaléine permet de distinguer les zones de pH supérieur ou inférieur à 9. Cette limite est bien entendu essentielle vis-à-vis de la durabilité des armatures. Sa position dans un élé-

ment en béton est appelée front de carbonatation car la baisse du pH est normalement imputable uniquement à la carbonatation.

À l'occasion d'une recherche menée en Région wallonne sur un nouveau processus de dégradation dénommé « pourrissement de dalles de tabliers de ponts » [2], des observations surprenantes concernant la basicité du béton ont été faites. Par évaluation du pH et détermination de la teneur en alcalins, la réalcalinisation d'un béton anciennement carbonaté a été mise en évidence sur un premier cas (dénommé cas d'étude). Ce phénomène a été confirmé par l'examen d'autres ouvrages.

## CONTEXTE DU POURRISSSEMENT DE DALLES DE TABLIERS

Depuis 1985, l'administration belge a rencontré des cas de dégradation du béton de tabliers de ponts à poutres [2]. Le processus, dénommé « pourrissement de dalles de tabliers de ponts », peut conduire à terme au percement de la dalle. Il peut présenter plusieurs formes :

- délamination du béton en face supérieure ou inférieure sans lien avec la position des lits d'armatures ;
- désagrégation du béton en face supérieure ou inférieure.

Ces altérations se manifestent également par la présence de taches généralement foncées en face inférieure du tablier (**figure 1**). Celles-ci restent visibles quelles que soient les conditions météorologiques. Il ne s'agit donc pas de « simples » taches d'humidité.

**figure 1**  
*Taches foncées en face inférieure d'un pont.*



En septembre 2005, soixante-huit cas de pourrissement de tabliers de ponts avaient été constatés depuis 1984, sur environ 3 500 ponts gérés. Compte tenu de l'importance des dégradations, une recherche a été entreprise d'abord en interne au ministère de l'Équipement et des Transports (MET), et ensuite en collaboration avec les centres de recherches des auteurs et le Centre de recherche de l'industrie cimentière (CRIC). Cette étude a permis de mettre en évidence la nature complexe de cette pathologie qui résulte de la combinaison des phénomènes suivants :

- réactions alcalis-granulats,
- réactions sulfatiques,
- réactions chimiques avec les chlorures,
- cycles de gel-dégel.

S'il est établi que ces pathologies se manifestent aux endroits où l'étanchéité du tablier est déficiente, il n'en reste pas moins difficile de connaître, à l'heure actuelle, la chronologie précise des

événements. Dans le cadre de cette recherche, des anomalies de la basicité du béton ont été observées dans la couche inférieure de la dalle au droit des taches foncées. Un ouvrage a été spécifiquement étudié vis-à-vis de ces évolutions surprenantes du pH.

## CAS D'ÉTUDE

### ■ Introduction

Le premier cas sur lequel des variations anormales de la basicité du béton ont été observées dans le cadre de la recherche évoquée ci-dessus est dénommé cas d'étude. Cet ouvrage (**figure 2**), construit en 1971, est composé de deux travées et deux tabliers constitués chacun de cinq poutres postcontraintes coulées en place. La dalle de l'ouvrage, dont l'épaisseur varie de 18 à 22 cm, présente de nombreuses délaminations (ruptures horizontales). D'importantes taches foncées, dont l'évolution a été assez importante ces dernières années, sont visibles en face inférieure (**figure 1**).

**figure 2**  
Vue générale du pont.



Les caractéristiques du béton du tablier de ce pont ont été déterminées sur de nombreuses carottes prélevées dans l'ensemble de la dalle :

- les granulats sont composés de porphyre, de calcaire partiellement silicifié et de silex ;
- la teneur moyenne en ciment est de  $340 \text{ kg/m}^3$  ;
- en face inférieure, la profondeur de carbonatation, déterminée au test à la phénolphthaleïne, est d'environ 15 mm en dehors des taches, et apparaît comme nulle dans les taches. La teinte peut évoluer de l'incolore au rouge en passant par le rose (**figures 3 à 5**) ;
- la résistance à la compression est comprise entre 40 et 60 MPa ;
- la résistance à la traction (cohésion interne) hors délamination est inférieure à 2,3 MPa ;
- la teneur en chlorures de la masse du béton (déterminée par extraction à l'acide) est parfois supérieure à 0,06 % avec un maximum de 0,16 % en partie supérieure de la dalle dégradée ;
- la teneur en alcalins varie de 0,03 à 0,34 % de la masse du béton pour  $\text{Na}_2\text{O}$  et de 0,10 à 0,62 % pour  $\text{K}_2\text{O}$  ; ces variations correspondent à une concentration croissante vers le bas de la dalle ;
- la teneur en sulfates est assez constante sur la hauteur de la dalle et voisine de 0,5 % de la masse du béton ;
- des précipitations secondaires sont détectées en zones dégradées : gels de silice, ettringite secondaire et un gel ettringitique chloruré (masse peu cristalline contenant Al, Ca, Si et S, Cl).

Lors de ces investigations, une incohérence est apparue entre le test à la phénolphthaleïne et l'observation des carottes. En effet, sur un béton à base de ciment portland, la zone carbonatée est

**figure 3**

Test à la phénolphthaléine :  
teinte rouge sur toute  
l'épaisseur (face inférieure  
en bas de la photo).

**figure 4**

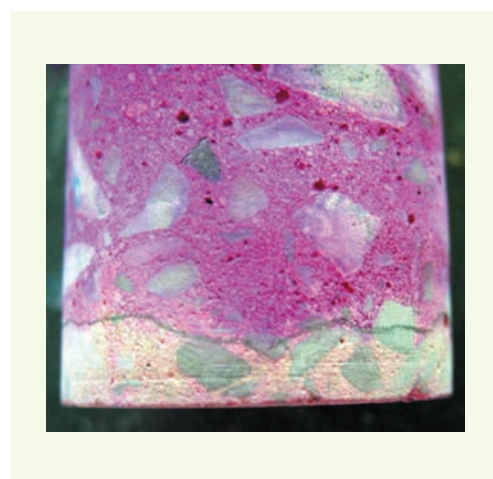
Test à la phénolphthaléine :  
teinte incolore sur la partie  
inférieure (face inférieure  
en bas de la photo).

**figure 5**

Test à la phénolphthaléine :  
teinte rose sur la partie  
inférieure (face inférieure  
en bas de la photo).



3  
4/5



souvent clairement visible par simple examen visuel, la mesure du pH par test à la phénolphthaléine confirmant systématiquement cette observation. Cependant, sur certains ouvrages présentant des taches foncées en face inférieure, cette correspondance n'est plus observée principalement au droit de ces taches. En outre, au droit de ces dernières, la face inférieure de la dalle vire au rouge lors du test à la phénolphthaléine (**figure 6**). Ces anomalies ont conduit à examiner plus en détail la couche carbonatée au droit des taches foncées.

### ■ Étude de la zone carbonatée au droit des taches foncées

Une zone tachée de la dalle a été échantillonnée par carottages réalisés depuis la face inférieure de la dalle (**figure 6**). Trois zones ont été étudiées depuis le centre de la tache jusqu'à l'extérieur de celle-ci.

Les trois carottes de 50 mm de diamètre sont positionnées comme suit :

- carotte 6.4 : prélevée à l'extérieur de la tache ;
- carotte 8.4 : prélevée dans la partie périphérique de la tache ;
- carotte 5.3 : prélevée au centre de la tache.

Les carottes ont été coupées en deux, perpendiculairement à la face inférieure. Une moitié a été destinée à l'étude pétrographique. L'autre a été découpée (**figure 7**) pour obtenir, pour chaque demi-carotte, trois tranches positionnées approximativement comme suit par rapport à la face inférieure :

- tranche 1 : de 30 à 45 mm de la face inférieure ;
- tranche 2 : de 15 à 30 mm de la face inférieure ;
- tranche 3 : de 0 à 15 mm de la face inférieure.

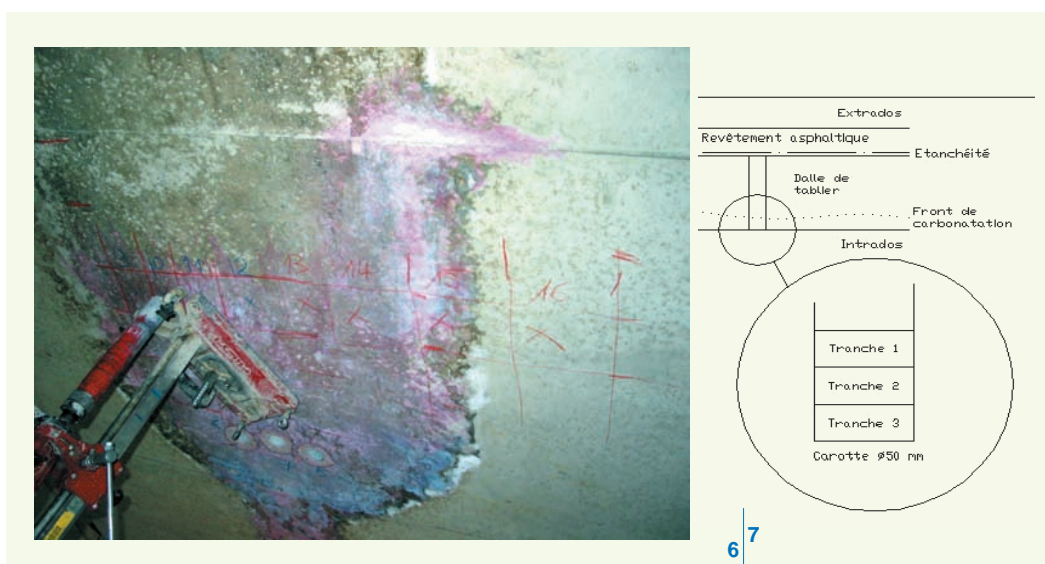


**figure 6**

Échantillonnage dans une tache en face inférieure de la dalle de tablier.

**figure 7**

Coupe dans le tablier de pont et positionnement des tranches de carottes.



Les déterminations suivantes ont été réalisées :

- évaluation du pH ;
- dosage des alcalins et des chlorures ;
- analyse calorimétrique différentielle (DSC) ;
- examen pétrographique.

Compte tenu de la faible épaisseur de la zone à étudier et de la nécessité de ne pas réaliser trop de carottages proches l'un de l'autre dans la dalle, la quantité de matière disponible était relativement limitée et n'a pas permis la réalisation d'autres types d'essais.

#### > Évaluation du pH

L'évaluation du pH a été effectuée suivant la norme prEN 14630 [3], par aspersion d'un indicateur coloré, la phénolphtaléine, qui est incolore en dessous de 8,3 et rouge au-dessus d'un pH de 10. Entre ces deux valeurs de pH, la coloration est rose de plus en plus foncée [4].

Avant de soumettre le béton au test à la phénolphtaléine, l'observation de la pâte de ciment a montré, sur chacune des carottes, une variation de teinte dans la partie inférieure de la face latérale, sur une épaisseur partout égale à environ 15 mm.

Le **tableau 1** reprend les observations effectuées après aspersion de la phénolphtaléine (**figure 8**).

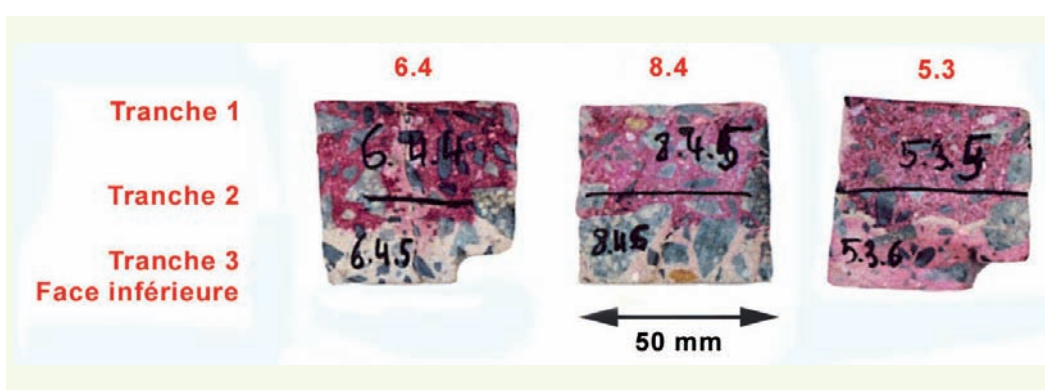
**tableau 1**

Résultats des observations visuelles après aspersion par la phénolphtaléine.

Carotte	6.4	8.4	5.3
Localisation par rapport à la tache	extérieure	périphérique	centrale
Coloration partie inférieure face latérale, sur environ 15 mm	sans	rose	rouge
Coloration face inférieure externe de la dalle	sans	rose	rouge

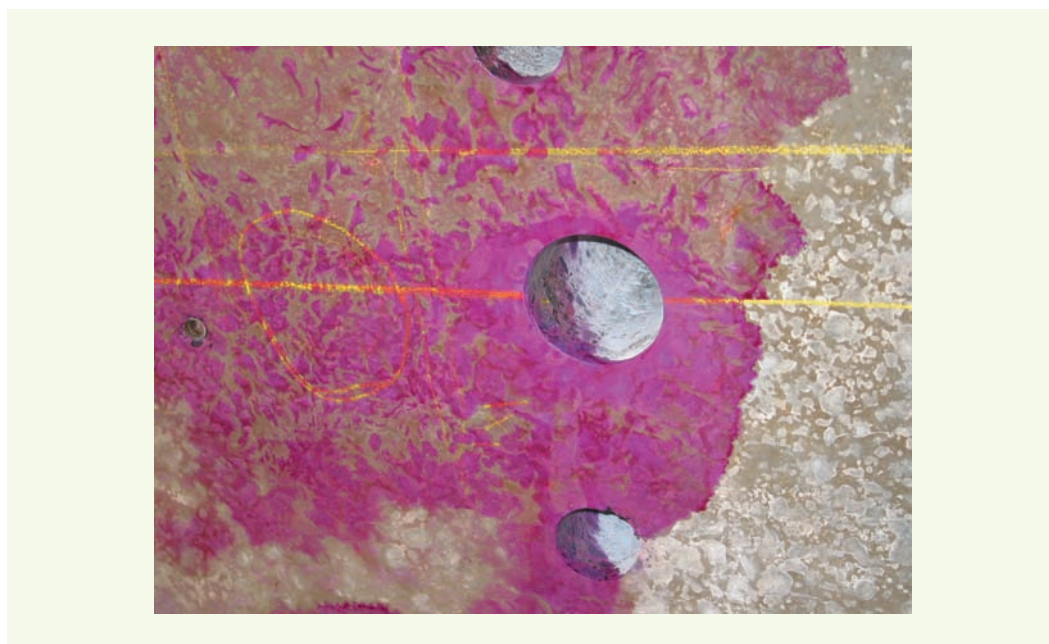
**figure 8**

Vue des trois tronçons des échantillons 6.4, 8.4 et 5.3 après aspersion par la phénolphtaléine et avant découpage en tranches. Hauteur = 45 mm.



La coloration obtenue après aspersion de phénolphthaléine *in situ* en face inférieure de la dalle suit les mêmes tendances. Au centre de la tache, une teinte rouge franche est observée (**figure 9**) en périphérie elle devient rose (**figure 6**) et à l'extérieur de la tache, aucune coloration n'est observée.

**figure 9**  
Face inférieure de dalle :  
test à la phénolphthaléine  
sur une tache.



#### › Dosage des alcalins et des chlorures

La teneur en chlorures est obtenue suivant la procédure décrite dans les normes NBN B15-250 [5] et NBN EN 480-10 [6], par attaque acide.

Les teneurs en alcalins sont obtenues par attaque acide, ébullition et neutralisation au carbonate de calcium, puis dosage du sodium et du potassium par absorption atomique.

Les résultats des analyses des trois échantillons sélectionnés sont présentés dans le **tableau 2**.

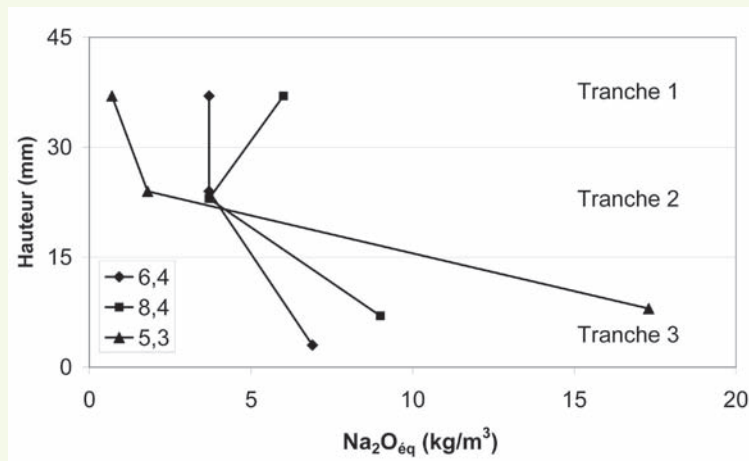
**tableau 2**  
Teneurs en alcalins et en  
chlorures – Les teneurs  
en  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$  et  $\text{Cl}^-$  sont  
exprimées en % en masse  
par rapport au béton.

Échantillon	Examen de l'échantillon		Examen des tranches					
	Visuel : épaisseur de la couche plus claire (mm)	Phénolphthaléine : position (mm) du virage et teinte partie inférieure	Tranches	Distance p/r à la face inférieure (mm)	$\text{Na}_2\text{O}$ %	$\text{K}_2\text{O}$ %	$\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$ $\text{kg/m}^3$	$\text{Cl}^-$ %
6.4 (Extérieur)	16	16 incolore	1	32-43	0,05	0,16	3,7	0,010
			2	17-31	0,05	0,17	3,7	0,010
			3	0-6	0,11	0,28	6,9	0,012
8.4 (Périphérie)	14	14 rose	1	32-43	0,08	0,27	6,0	0,019
			2	15-31	0,05	0,17	3,7	0,008
			3	0-14	0,16	0,34	9,0	0,010
5.3 (Centre)	17	Tout l'échantillon est rouge	1	32-43	0,02	0,05	0,7	0,017
			2	18-31	0,02	0,09	1,8	0,012
			3	0-17	0,34	0,62	17,3	0,009

Les teneurs en alcalins équivalents ( $\text{kg/m}^3$ ), calculées en prenant une masse volumique de  $2\,300\text{ kg/m}^3$ , augmentent vers la face inférieure (tranche 3) (**figure 10**). Cette tendance est d'autant plus marquée que l'échantillon se situe près du centre de la tache. Le responsable de ce gradient en alcalins est principalement le lessivage du potassium vers le bas de la dalle.

**figure 10**

Profils des teneurs en  
alcalins des échantillons  
6.4, 8.4 et 5.3.



Les teneurs en chlorures sont faibles (inférieures à 0,02 %). Les chlorures ne semblent donc pas intervenir dans le processus étudié.

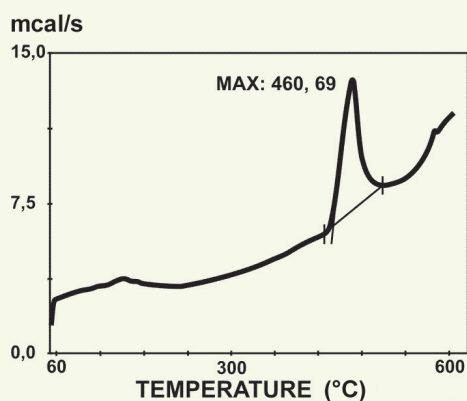
#### ➤ Analyse calorimétrique différentielle

L'analyse calorimétrique différentielle a été réalisée entre 60 et 600 °C au moyen d'un appareil Perkin-Elmer DSC 4.

Les analyses réalisées dans les tranches 2 des échantillons 6.4, 8.4 et 5.3 sont caractérisées par la présence du pic endothermique de  $\text{Ca(OH)}_2$  à 460 °C (figure 11). Par contre, celles réalisées dans les tranches 3 sont caractérisées par l'absence de ce pic (figure 12). Ceci prouve que les tranches inférieures 3 n'ont pas conservé la portlandite  $\text{Ca(OH)}_2$ , qui aurait pu être responsable des pH élevés observés sur certains échantillons.

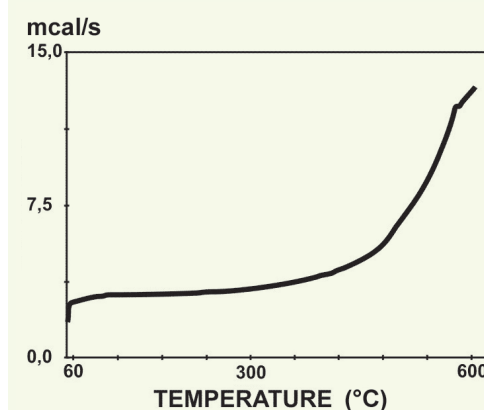
**figure 11**

Analyse calorimétrique  
différentielle dans une  
tranche 2.  
Présence du pic  
endothermique à  $\pm 460$  °C  
correspondant à  $\text{Ca(OH)}_2$ .



**figure 12**

Analyse calorimétrique  
différentielle dans une  
tranche 3.  
Absence de pic  
endothermique à  $\pm 460$  °C  
correspondant à  $\text{Ca(OH)}_2$ .



11 | 12

L'analyse calorimétrique différentielle prouve donc que ces tranches inférieures 3 ont été carbonatées.

#### ➤ Examen pétrographique

Les carottes ont été sciées perpendiculairement à la surface inférieure de la dalle du tablier, pour réaliser les observations à cheval sur les tranches 2 et 3. Après imprégnation de résine, des lames minces de 30 microns d'épaisseur ont été confectionnées par sciage et rodage, puis observées sur la platine d'un microscope optique pétrographique polarisant.

L'observation pétrographique en lumière polarisée a permis de mettre en évidence le front de carbonatation à environ 15 mm de la surface inférieure. Au-dessus du front, la pâte de ciment apparaît

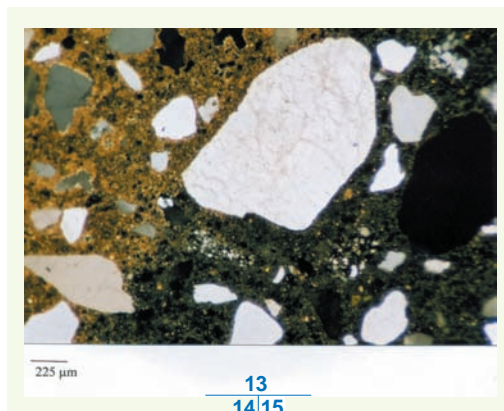
noire (tranche 2) ; en dessous du front, la pâte de ciment apparaît brune orangée (tranche 3), coloration typique de la pâte de ciment carbonatée en lumière polarisée.

Ce phénomène est observé pour les trois échantillons 6.4 (**figure 13**), 8.4 (**figure 14**) et 5.3 (**figure 15**).

L'examen pétrographique confirme les résultats de l'analyse par calorimétrie différentielle, à savoir que la tranche inférieure (3) des trois échantillons a bien été carbonatée.

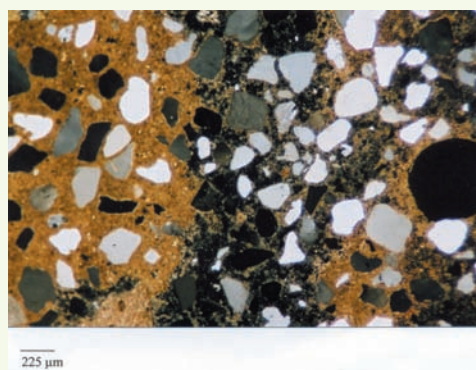
**figure 13**

Observation au microscope de la lame mince de l'échantillon 6.4 en lumière polarisée. Vue du front de carbonatation : la pâte de ciment non carbonatée apparaît noire, celle carbonatée apparaît brune orangée.



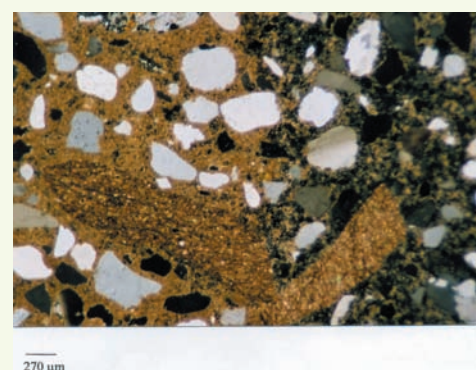
**figure 14**

Observation au microscope de la lame mince de l'échantillon 8.4 en lumière polarisée. Vue du front de carbonatation : la pâte de ciment non carbonatée apparaît noire, celle carbonatée apparaît brune orangée.



**figure 15**

Observation au microscope de la lame mince de l'échantillon 5.3 en lumière polarisée. Vue du front de carbonatation. La pâte de ciment non carbonatée apparaît noire. Celle carbonatée apparaît brune orangée.



## ■ Synthèse des observations sur le cas d'étude

L'analyse détaillée de cet ouvrage indique que la partie inférieure de la dalle de tablier est carbonatée sur environ 15 mm de profondeur. Toutefois, au droit des taches, le pH reste élevé dans cette couche inférieure et parfois même en face inférieure. Le lessivage des alcalins, principalement le potassium, est bien corrélé avec ces pH élevés. Pour pouvoir établir ce lien de causalité éventuel, il reste à connaître la forme que prennent ces alcalins dans cette zone.

## ANALYSE D'AUTRES CAS

Les tendances observées sur le cas d'étude se retrouvent sur d'autres tabliers de ponts. Parmi ceux-ci, certains sont caractérisés en outre par la présence d'une poudre blanche, au niveau des taches, en face inférieure du tablier. L'analyse de ces efflorescences va apporter la réponse recherchée au paragraphe précédent.

## ■ Analyse de la poudre blanche

Plusieurs analyses sont réalisées. Après mise en solution dans de l'eau déminéralisée, le pH de la solution obtenue est égal à 10,4.

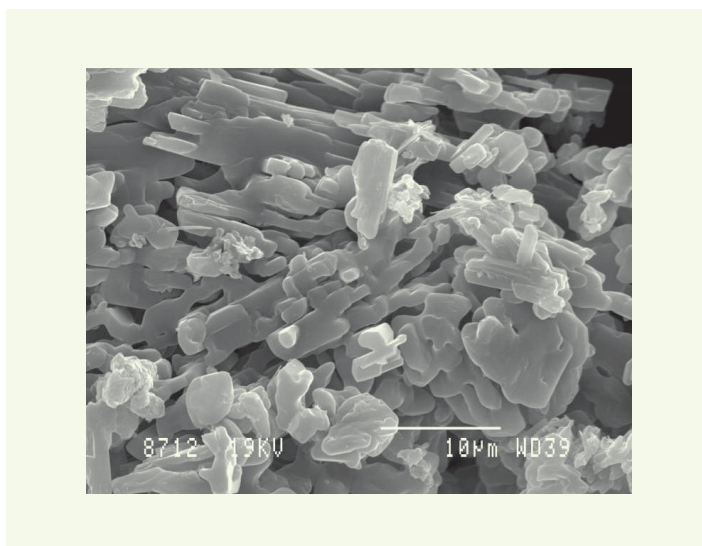
L'analyse calorimétrique différentielle (DSC) montre la présence d'un pic à 118 °C, dont la nature n'a pas été déterminée.

Une analyse au microscope électrique à balayage a donc été réalisée ; elle a mis en évidence des cristaux trapus (**figure 16**).



**figure 16**

Observation au microscope électronique à balayage de la poudre blanche prélevée en face inférieure de la dalle de tablier : présence de cristaux trapus.



L'analyse par diffractométrie des rayons X (RX) (méthode des poudres) met en évidence la présence de la thermonatrite,  $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$  et de trona  $\text{Na}_3(\text{HCO}_3)(\text{CO}_3) \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ .

De telles occurrences hydrocarbonatées sont rarement décrites en génie civil. En 1990, Macleod *et al.* [7] les citent comme phases peu communes détectées par Charola *et al.*, en 1979 dans des constructions en pierres [8]. Plus récemment, Guthrie *et al.* [9] font mention de calcite et de thermonatrite en face inférieure du tablier d'un pont à New Mexico.

## ■ Synthèse

La poudre blanche observée sur certaines taches de certains ouvrages est constituée de thermonatrite et de trona, deux hydrocarbonates caractérisés par un pH élevé. La forme que prennent les alcalins lessivés en bas de la dalle apparaît donc plus clairement.

## INTERPRÉTATION DES RÉSULTATS

Les résultats obtenus ci-dessus, tant pour le cas d'étude que pour les autres cas conduisent à la description suivante de l'évolution physico-chimique de la dalle :

- carbonatation progressive de la face inférieure de la dalle avec formation de carbonate de calcium ;
- localement :
  - altération de l'étanchéité, impliquant des infiltrations d'eau ;
  - remobilisations chimiques ;
  - migrations des alcalins vers le bas, sous forme d'hydroxydes alcalins ;
  - combinaison des hydroxydes alcalins au carbonate de calcium, pour former des hydrocarbonates de pH élevés avec apparition des taches foncées en face inférieure ;
  - parfois, formation en face inférieure de la dalle de dépôts d'hydrocarbonates.

## CONCLUSIONS

L'étude des cas exposés montre qu'un béton carbonaté, par transformation des hydroxydes de calcium en carbonates de calcium, avec baisse consécutive du pH, peut voir son pH réaugmenter localement au droit des zones de déficiences de l'étanchéité, suite à la migration d'hydroxydes alcalins, qui se combinent aux carbonates pour former des hydrocarbonates alcalins.

Ce phénomène n'est pas sans influencer les résultats du test à la phénolphthaléine. L'intérêt de déterminer le pH du béton réside dans l'appréciation de sa capacité à passiver les armatures. Que l'alcalinité soit attribuée à la présence de portlandite ou à celle d'hydrocarbonates alcalins ne modifie en rien cette capacité de passivation. La pertinence du test à la phénolphthaléine n'est donc nullement remise en cause de ce point de vue.

Toutefois, la limite de pH égal à 9 est habituellement prise pour distinguer un béton carbonaté d'un béton non carbonaté. Il vient d'être démontré que, dans certains cas particuliers, cette déduction peut être faussée par la réalcalinisation spontanée du béton. Si tel est le cas, cela implique des infiltrations d'eau et des remobilisations chimiques. Il est dès lors à craindre pour la qualité du béton et sa durabilité. Rappelons en outre que la limite de passivation fixée à un pH de 9 est valable uniquement en absence de chlorures. S'il y a des infiltrations d'eau, il est à craindre également des pollutions par les chlorures ; de ce fait, le pH correspondant à la passivation sera plus élevé.

Déterminer l'origine de l'alcalinité élevée d'un ancien béton est donc important. La combinaison de la présence de taches et d'un comportement anormal au test à la phénolphthaléine permet de suspecter une réalcalinisation spontanée du béton carbonaté en partie inférieure.

#### REMERCIEMENTS

*Les auteurs remercient la Direction générale des autoroutes et des routes ainsi que la Direction générale des services techniques du ministère de l'Équipement et des Transports pour le soutien financier qu'ils ont apporté à cette recherche.*

#### RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- 1 **POURBAIX M.**, *Leçons en corrosion électrochimique*, Centre belge d'étude de la corrosion – CEBELCOR, **1975**, 377 pages.
- 2 **DEMARS Ph., GILLES P., DONDONNE E., DEGEIMBRE R., DARIMONT A., LORENZI G., MERTENS A.**, Dégradation de dalles de tablier de ponts en Belgique - Étude d'une pathologie complexe, *Bulletin des laboratoires des ponts et chaussées*, **232**, **2001**, pp. 73-83.
- 3 *Carbonatation depth in hardened concrete*, **prEN 14630**, **2003**.
- 4 **PERRY J.H.**, *Chemical Engineers' handbook*, McGraw-Hill Book Company Edition, **1950**, p. 284.
- 5 *Analyse chimique des mortiers et bétons durcis*, **NBN B15-250**, **1991**.
- 6 *Adjuvants pour bétons, mortiers et coulis - Méthode d'essai - Partie 10 : Détermination de la teneur en chlorure soluble dans l'eau*, **NBN EN 480-10**, **1996**.
- 7 **MACLEOD G., HALL A.J., FALICK A.E.**, An applied mineralogical investigation of concrete degradation in a major concrete road bridge, *Mineralogical Magazine*, **54**, **1990**, pp. 637-644.
- 8 **CHAROLA A.E., LEWIN S.Z.**, Efflorescences on building stones – SEM in the characterisation and elucidation of the mechanisms of formation, *Scanning Electron Microscopy*, **1**, **1979**, pp. 379- 386.
- 9 **GUTHRIE G.D., CAREY J.W.**, A geoscience approach to rock-solid concrete. *Earth and Environmental Sciences*, Progress report **1998-2000**, pp. 34-37.