La formation différée de l'ettringite dans les bétons de parties d'ouvrages massives

Synthèse des études de ponts dégradés

Loïc DIVET Laboratoire Central des Ponts et Chaussées

Résumé

La formation différée de l'ettringite est une réaction chimique qui peut être à l'origine de la dégradation des bétons. Il s'agit d'une réaction sulfatique interne susceptible d'affecter l'ensemble du béton sans faire appel à une source extérieure de sulfates. Elle provoque alors un gonflement du matériau qui engendre une fissuration de la structure. La démarche entreprise a consisté à expertiser cinq bétons d'ouvrages d'art soumis exclusivement à une altération due à la formation différée de l'ettringite. La coexistence d'une réaction alcali-silice n'a pas été observée. Les facteurs déterminants de la réaction ont été recherchés.

L'étude de matériaux en service montre que cette dégradation ne concerne pas uniquement les bétons traités thermiquement, mais peut aussi se rencontrer dans les ouvrages en béton de grande masse. Pour ces derniers, le cycle thermique apparaît comme plus sévère compte tenu de la durée de maintien à haute température (> 70 °C pendant plusieurs jours). Plusieurs paramètres apparaissent comme indispensables pour le développement de la réaction : pièce en béton massive, coulage du béton en période estivale, dosage en ciment élevé, nature du ciment (ciment Portland, teneurs en alcalins, SO₃ et C₃A), conditions d'humidité élevée et nature minéralogique des granulats. La conjonction de ces différents paramètres limite vraisemblablement le nombre d'ouvrages touchés par cette dégradation.

DOMAINE : Ouvrages d'art.

ABSTRACT

DELAYED ETTRINGITE FORMATION IN MASSIVE CONCRETE STRUCTURES: SUMMARY OF STUDIES CONDUCTED ON DETERIORATED BRIDGES

The Delayed Ettringite Formation is a chemical reaction that may lie at the origin of deterioration in concrete. This internal sulfate reaction is capable of altering the entire concrete structure without relying upon an external sulfate source; it thereby causes swelling of the material, which in turn incites cracking of the structure. The approach undertaken herein has consisted of appraising five structural concretes submitted exclusively to an alteration due to the delayed Ettringite Formation. The simultaneous existence of an alkali-silica reaction was not observed, and the determinant factors involved in the reaction have been sought.

The study of materials employed has revealed that this deterioration does not solely entail heat-treated concretes, but may also be encountered within large-scale solid concrete facilities. For this latter material application, the heat cycle appears more intense given the duration in which high temperatures are maintained (> 70 °C over several days). A number of parameters stand out as being essential to the development of the reaction: solid concrete specimen, concrete casting during the summer period, a high cement proportion, type of cement (Portland cement, alkaline content, SO₂ and $C_{3}A$), more humid ambient conditions and mineralogical nature of the aggregates. The combination of such parameters serves in all likelihood to limit the number of structures affected by this type of degradation.

FIELD: Structural engineering.

Introduction

Quelques cas de dégradation d'ouvrages en béton ont été attribués à la réaction sulfatique interne et, plus précisément, à la formation différée de l'ettringite. À la différence des réactions sulfatiques plus classiques où les sulfates agressent le béton depuis l'extérieur en provoquant une dégradation progressive de la surface vers le cœur de la pièce, la réaction sulfatique interne affecte l'ensemble du béton sans faire appel à une source extérieure de sulfates. Elle se manifeste alors par un gonflement du matériau et une fissuration de la structure. L'origine du gonflement est attribuée à la formation d'ettringite qui présente, sous certaines conditions thermodynamiques, des propriétés expansives. La présence d'ettringite dans une fissure ne constitue pas, à elle seule, la preuve d'un mécanisme délétère, puisque l'on observe parfois la présence de ce minéral dans les fissures qui existent dans la plupart des ouvrages en béton (fissuration fonctionnelle du béton armé ou fissures de retrait). Cependant, la présence d'ettringite reste un indicateur important du processus de formation différée de l'ettringite, car, sans ettringite, il n'y a pas de gonflement. Le diagnostic de cette réaction doit donc être fondé sur la conjonction de plusieurs paramètres, parmi lesquels il y a notamment la température atteinte par le matériau au tout jeune âge. Ce phénomène concerne principalement les bétons ayant subi un traitement thermique relativement sévère [Heinz et Ludwig, 1986, 1987 ; Heinz et *al.*, 1989]. Il est rencontré dans des bétons dont les compositions sont particulièrement sensibles et qui sont soumis à un environnement propice à long terme (humidification fréquente). Mais la formation différée de l'ettringite peut aussi se rencontrer dans des pièces massives en béton coulées en place [Hobbs, 1999 ; Quilin, 2001]. En France, la découverte de ce phénomène et de ses manifestations délétères est récente, avec les premiers cas identifiés en 1998 [Divet et *al.*, 1998]. Les cas de structures dégradées répertoriées sont pour l'instant peu nombreux (environ une douzaine), mais suffisamment importants pour que l'on s'y intéresse.

La démarche entreprise pour mieux comprendre ce type d'altération a consisté à expertiser des structures suspectes. Nous avons alors réalisé une étude des matériaux en service soumis aux altérations dues à la formation différée de l'ettringite. Ces cas réels sont alors susceptibles d'apporter des éléments de réponse au problème complexe de cette formation différée de l'ettringite et constituent donc un complément indispensable aux études fondamentales en laboratoire. Cinq ponts ont ainsi été choisis parmi les cas réels qui nous ont été soumis. Leurs bétons ont fait l'objet de diverses investigations pour déterminer l'origine des dégradations et rechercher les facteurs simultanément présents et nécessaires au développement de la réaction de formation de l'ettringite. L'étude repose sur une approche globale, c'est-à-dire qu'elle doit prendre en compte à la fois les aspects microscopiques propres au matériau et les aspects macroscopiques liés à la structure (environnement, sollicitations mécaniques, etc.). Différentes techniques d'investigations, complémentaires entre elles, ont été utilisées. Avant de commenter les renseignements ainsi obtenus, nous présenterons les désordres observés sur les ouvrages et nous décrirons brièvement les méthodes de diagnostic employées. Nous nous intéresserons enfin au rôle respectif des différents constituants du béton et de son environnement sur la réaction.

Description des désordres apparents

Les cinq ponts étudiés ont été construits entre 1955 et 1990. Les désordres ne touchent jamais la totalité de l'ouvrage, mais essentiellement les parties relativement massives. Par ailleurs, les parties d'ouvrage affectées par des désordres ne sont pas soumises à des sollicitations mécaniques importantes, compte tenu de la dimension de ces pièces. Pour conserver le caractère confidentiel de ces expertises, nous avons référencé les ouvrages par une lettre.

Pont « A »

Ce pont a été achevé et mis en service en 1955. Il est constitué de quatre poutres précontraintes par pré-tension, reliées entre elles par un hourdis et des entretoises. Il a une longueur totale de 202 m et comporte cinq travées indépendantes. Les piles ont une hauteur moyenne de 6,8 m. Elles sont fondées sur un massif en béton encastré dans le substratum molassique et sont formées de deux fûts circulaires, de 2 m de diamètre, reliés en tête par un chevêtre. Celui-ci est, soit creux dans le cas des piles P1 et P3 et forme alors un caisson qui reçoit les appareils d'appui mobiles, soit plein dans le cas des piles P2 et P4 et est équipé d'appareils d'appui fixes.

Les désordres ne concernent que le chevêtre d'une seule pile pour lequel le béton a été mis en place durant le mois d'août 1954. Il s'agit d'un chevêtre parallélépipédique plein en béton armé, de dimensions 1,5 m de hauteur, 8,2 m de longueur et 2,7 m de largeur. Les premiers défauts apparents ont été observés lors d'une inspection détaillée effectuée en 1982. Le rapport d'inspection indiquait l'existence d'une fissuration ainsi que la présence d'une abondante végétation localisée aux extrémités du sommier de la pile. Dans les précédents rapports d'inspection, il n'était pas fait mention de l'existence de ces défauts. Par conséquent, cela laisse supposer que les désordres sont apparus à partir du début des années 1980.

Les désordres se manifestent sous la forme d'un réseau de fissures multidirectionnelles à larges mailles. La fissuration présente parfois des orientations préférentielles en fonction de la distribution des armatures. L'ouverture des fissures varie de quelques dixièmes de millimètres à quelques mil-

limètres suivant les zones observées. Les fissures sont souvent soulignées par l'humidité et on observe parfois un exsudat blanchâtre ou grisâtre au droit des fissures (fig. 1). En outre, les fissures apparaissent comme plus prononcées dans le sens horizontal et peuvent atteindre parfois des ouvertures de 7 mm.

Enfin, les désordres se rencontrent principalement aux extrémités du chevêtre. Il s'agit, en fait, des surfaces directement soumises aux intempéries et aux coulures d'eau en provenance des trottoirs et de parties peu sollicitées par les descentes de charge du tablier. La partie centrale du chevêtre ne présente pas de défaut apparent.



Fig. 1 - Fissuration multidirectionnelle localisée aux extrémités du chevêtre d'une pile du pont « A ».

Pont « B »

Ce pont a été construit en 1967 et comporte six travées d'une portée de 25 m chacune. L'ensemble des cinq piles du pont est affecté par un réseau de fissures formant un quadrillage plus ou moins régulier (fig. 2). Les fissures apparaissent généralement au droit des reprises de bétonnage, mais aussi entre ces reprises.

Les fissures verticales les plus importantes sont souvent celles situées au droit des descentes d'eau qui équipent les piles en amont et en aval à l'intérieur des fûts. Ces fissures ont fait l'objet, vraisemblablement en 1979, d'un colmatage à l'aide de produits de réparation. En 1993, l'inspection détaillée montrait que certaines de ces fissures (verticales et horizontales) apparaissent à travers cette protection. Les ouvertures varient d'un dixième de millimètre à plusieurs millimètres.



Pont « C »

L'ouvrage a été construit durant les années 1980-1981. Sa structure est du type VIPP (Viaduc Indépendant à Poutres Précontraintes) avec un tablier de trois travées, de 120 m de longueur et de 13 m de largeur. Ce viaduc comporte une culée Nord fondée sur un massif de béton, une culée Sud reposant sur le rocher et deux piles fondées sur semelles. Les désordres sont localisés au niveau des chevêtres des deux piles. Chaque pile est composée d'un fût de section inscrit dans un rectangle de $3,1 \times 7,5$ m, d'une hauteur de 14,5 m pour la pile Nord et de 9,3 m pour la pile Sud. Elles sont surmontées d'un chevêtre de 14,0 m de longueur et 3,5 m de largeur dont la hauteur est variable de 1,1 m à 2,0 m. D'après les relevés effectués sur chantier, la réalisation des deux chevêtres s'est effectuée durant les mois d'août et de septembre 1980.

Le chevêtre de la pile Nord présente une fissuration verticale dense sur les deux faces avec une ouverture maximale variant de 0,2 mm à 1,2 mm (fig. 3). Certaines fissures présentent des coulures de calcite indiquant des circulations d'eau au sein du béton. Plusieurs fissures horizontales sont également observées et semblent se trouver sur des reprises de bétonnage. Le relevé de la fissuration établi en 1997 pour le chevêtre de la pile Nord est représenté en rouge sur la figure 4. Il est constaté une évolution notable de la fissuration par rapport à l'inspection effectuée en 1989.



Fig. 3 - Réseau de fissures au niveau du chevêtre de la pile Nord.



(--- : inspection en 1989, --- : inspection en 1997).

Le chevêtre de la pile Sud présente le même type de désordre, mais le phénomène y apparaît comme moins développé. En effet, l'ouverture maximale des fissures est de 0,3 mm, excepté à l'about est du chevêtre où l'ouverture atteint 1,7 mm. De plus, le réseau de fissures est plus dense et des efflorescences sont observées dans cette zone. Enfin, l'absence d'évacuation des eaux des appuis (culées et piles) a pu être mise en évidence lors de l'inspection détaillée réalisée en 1997.

Pont « D »

Cet ouvrage a été construit durant les années 1988-1989 et a été mis en service en 1990. Il s'agit d'un pont caisson à 6 travées d'une longueur totale de 385 m reposant sur 7 appuis (2 culées et 5 piles). Les 5 piles sont de géométrie massive, en béton armé, de longueur 6,3 m et de largeur 3,0 m. Les désordres sont principalement localisés au niveau d'une pile, pour laquelle une fissuration multidirectionnelle typique d'une réaction de gonflement interne du béton est observée (fig. 5). De plus, ce faïençage est essentiellement présent dans la zone de marnage qui est en moyenne de l'ordre de 3 à 4 m. Il concerne les quatre faces de la pile et semble progresser dans la partie hors d'eau. Le béton de cette pile a été coulé durant les mois d'août et de septembre 1989. Les autres piles de l'ouvrage comportent des fissures verticales dont l'ouverture peut atteindre 0,8 mm. Néanmoins, ces fissures ont été constatées dès la construction de l'ouvrage et ont été attribuées au retrait thermique du béton.

Pont « E »

Cet ouvrage repose sur 9 appuis composés de 2 culées et de 7 piles. Les désordres concernent essentiellement les deux piles implantées dans le lit du fleuve (fig. 6). Ces dernières subissent un marnage pouvant atteindre parfois deux mètres de hauteur. Cela conduit bien sûr à des cycles d'humidification/séchage qui facilitent les mécanismes de transport de matières au sein du béton. Les piles présentant des désordres ont été coulées en août et en septembre 1990. Il s'agit de pièces en béton relativement massives dont la hauteur moyenne est de 6,5 m, pour une longueur de 11 m et une épaisseur de 3 mètres.

Les désordres se localisent principalement dans la zone de marnage et la partie immergée. Des fissures importantes sont constatées préférentiellement dans le sens longitudinal. Elles sont accompa-



Fig. 5 - Pile du pont « D » présentant une fissuration en réseau dans la zone de marnage.

gnées d'un nombre considérable de fissures dans le sens transversal. Toutefois, ces dernières présentent une ouverture plus faible. Ce maillage de fissures fait parfois apparaître des exsudats, et des gonflements du béton sont observés par endroits.



Méthodes d'investigations

Les investigations menées reposent essentiellement sur des analyses minéralogiques quantitatives [Deloye, 1977 ; Longuet et Deloye, 1983] effectuées sur des échantillons prélevés dans chacun des ouvrages et comportent les méthodes suivantes :

- mesure de la masse volumique apparente et de la porosité par pesées hydrostatiques ;
- analyse chimique du filtrat d'une attaque « ménagée » du matériau par l'acide nitrique 0,25 mol.L⁻¹;
- détermination des espèces minérales présentes par diffractométrie des rayons X ;
- analyses thermogravimétrique et thermique simultanées ;
- examen au microscope électronique à balayage couplé à l'analyse par spectrométrie X à dispersion d'énergie.

Les résultats de ces investigations sont ensuite traités par itération à l'aide du programme « Minéraux », pour en extraire la composition minéralogique quantitative qui permet de reconstituer la composition du béton à l'origine.

Les ouvrages ont fait l'objet de plusieurs carottages, de profondeur variable (de 30 à 60 cm). Il est important de signaler que les prélèvements doivent être effectués suffisamment profondément pour être représentatifs des températures maximales atteintes dans la pièce en béton. Dans le cas contraire, le matériau est susceptible d'apparaître comme sain alors que des produits délétères peuvent être présents à cœur. Les prélèvements sont effectués dans les zones dégradées, mais aussi dans des zones saines pour permettre une comparaison. Tous les prélèvements sont conservés dans des sacs étanches en attendant d'être étudiés.

Détermination de la masse volumique et de la porosité

Il s'agit des mesures de densité et de porosité à l'eau nécessaires entre autres au calcul de la teneur en ciment du béton. Elles sont réalisées par pesées hydrostatiques d'un échantillon d'environ 200 g de béton, prélevé au cœur des carottes, selon le mode opératoire recommandé par l'Association Française du Génie Civil [AFPC-AFREM, 1997].

Analyses chimiques

Les analyses chimiques sont réalisées après mise en solution par une attaque à l'acide nitrique $0,25 \text{ mol.L}^{-1}$. Cette mise en solution sélective a pour but de solubiliser uniquement le liant du béton et la partie calcaire des granulats.

Le résidu insoluble est obtenu après filtration de la solution d'attaque et calcination à 1 000 °C.

Le sodium et le potassium sont dosés par spectrométrie d'absorption atomique (Perkin Elmer AA100). Le calcium, le silicium, le fer, le magnésium et l'aluminium ont été déterminés par spectrométrie d'émission atomique à source plasma (Jobin Yvon JY24).

La teneur en sulfates et la perte au feu sont déterminées par gravimétrie selon la norme NF EN 196-2.

Diffractométrie des rayons X

Les analyses diffractométriques sont effectuées sur un diffractomètre Philips PW 1830 avec le rayonnement K_{α} du cobalt et un compteur proportionnel. Les diffractogrammes sont enregistrés entre 6 et 68° (20), d'une part sur les échantillons bruts broyés à une granulométrie tout juste inférieure à 315 µm et, d'autre part, sur la partie enrichie en liant, obtenue après élimination des gravillons et broyée jusqu'à passage sans refus sur un tamis de 80 µm. Le faible broyage des échantillons est justifié par le risque d'altération de la structure aciculaire et fragile des cristaux d'ettringite [Millet et *al.*, 1980].

Analyses thermiques

Les analyses thermiques sont réalisées avec un analyseur thermique simultané (Netzsch STA 409E). Cet appareil permet de pratiquer, sur un même échantillon, une analyse thermogravimétrique (ATG) et une analyse thermique différentielle (ATD). Ces analyses permettent de quantifier les différents départs d'eau (basse température, hydroxylique) et d'anhydride carbonique (CO₂ de carbonatation, de la dolomite et de la calcite).

Microscopie électronique à balayage

Les examens sont effectués à l'aide d'un microscope Philips XL 30 équipé d'une microsonde EDAX DX 4i pour l'analyse en dispersion d'énergie du spectre X émis. Nous avons choisi de travailler sur des cassures fraîches obtenues par fracture, afin de préserver l'apparence et l'agencement des minéraux constitutifs ainsi que la localisation des produits néoformés nocifs. Des examens sont aussi réalisés sur des échantillons polis.

Calcul minéralogique

Les résultats de ces investigations sont traités à l'aide du programme « Minéraux », pour en extraire la composition minéralogique quantitative qui permet de reconstituer la composition du béton à l'origine. Le calcul minéralogique détermine, entre autres, la teneur en ciment du béton par deux méthodes indépendantes, d'une part à partir d'une formule itérative dérivée de celle du CETIC (Centre d'Etudes Techniques de l'Industrie Cimentière) et, d'autre part, par un oxyde directeur, en général la silice soluble. Enfin, l'examen du bilan et des balances relatifs aux différents éléments dosés donne des indications, notamment sur les causes des dégradations éventuelles du matériau soumis à l'analyse. En particulier, un apport externe en sulfate se traduira par un

excès dans la balance correspondante au calcul minéralogique. Ce calcul, appliqué à un matériau sain, permet également de reconstituer la composition chimique du ciment ayant servi à la formulation des bétons.

Résultats et discussion

Identification et localisation des produits de dégradation

L'étude de la microstructure est réalisée par microscopie électronique à balayage. Les examens sont réalisés en utilisant la technique des électrons secondaires sur des cassures fraîches obtenues par fractures. On obtient ainsi des images topographiques caractérisant la morphologie des minéraux. D'autres examens ont parfois été effectués en utilisant la technique des électrons rétrodiffusés sur des surfaces polies. Cette méthode permet d'acquérir des images de composition (contraste de numéro atomique) donnant une information plus précise sur la localisation des minéraux.

Il est important de noter qu'aucun produit résultant d'une alcali-réaction n'a été observé dans les ouvrages étudiés. Par contre, les examens microscopiques montrent que les bétons étudiés font l'objet d'une importante attaque sulfatique. Par conséquent, l'étude présentée ici concerne bien spécifiquement cette pathologie et évite toute confusion avec des désordres dus à l'alcali-réaction. En effet, lors de la présence simultanée de ces deux sources de dégradation, il est difficile de déterminer celle qui est la principale responsable des désordres.

La réaction sulfatique se manifeste par la présence d'ettringite. Elle peut présenter différentes morphologies en fonction de l'espace dont elle dispose pour se former. Dans les cavités ou dans les bulles d'air entraîné (espace important), l'ettringite se présente en cristaux aciculaires plus ou moins orientés et, le plus souvent, perpendiculairement aux surfaces sur lesquelles elles se développent (fig. 7). De plus, les néoformations d'ettringite obstruent une grande partie de la porosité (fig. 8), mais ne fissurent pas la matrice. À l'interface pâte/granulats (espace réduit) l'ettringite se rencontre essentiellement sous un aspect mal cristallisé et massif. La notion d'aiguille disparaît et seule l'analyse élémentaire permet de distinguer cette forme d'ettringite (fig. 9). La fissuration observée provient de la préparation des échantillons qui entraîne un départ d'eau.



Fig. 7 - Détail des aiguilles d'ettringite formées dans la porosité du béton, grossissement = 4 000 (MEB – électrons secondaires).

Les granulats ou leurs empreintes sont tapissés de cette fine pellicule dont l'épaisseur est le plus souvent inférieure à 15 μ m (fig. 10) et peut atteindre parfois 40 à 50 μ m (fig. 11). En simplifiant, il est donc possible de distinguer ces différentes formes de l'ettringite en deux grandes catégories : l'ettringite bien cristallisée qui possède une forme régulière et l'ettringite massive pour laquelle on n'observe plus de cristaux individualisés.



Fig. 8 - Bulle d'air entraînée remplie d'aiguilles d'ettringite, grossissement = 400 (MEB – électrons secondaires).



Fig. 9 - Présence d'ettringite massive aux interfaces pâte/granulats, grossissement = 1 500 (MEB - électrons secondaires).



Fig. 10 - Empreinte de granulat déchaussé tapissée d'ettringite mal cristallisée (1), pâte de ciment (2) dans le béton, grossissement = 600 (MEB – électrons secondaires).



Fig. 11 - Forte épaisseur d'ettringite dans une empreinte de granulat du béton, grossissement = 800 (MEB – électrons secondaires).

La distinction des formes expansives et non expansives de l'ettringite reste délicate. Toutefois, le faciès observé, associé à la localisation de l'ettringite, peut donner une information pertinente sur le caractère gonflant ou non. En effet, le faciès caractéristique en aiguilles, où les cristaux sont bien individualisés, correspond à l'ettringite non expansive qui a précipité à partir de la solution interstitielle dans la porosité du béton (zones microporeuses de la pâte de ciment, pores ou bulles). Elle résulte d'une précipitation à partir d'une solution faiblement saturée, donc dans un état d'équilibre thermodynamique. Par contre, l'ettringite d'aspect massif et mal cristallisé est en relation avec une formation dans des conditions extrêmes de sursaturation de la solution interstitielle qui lui confère des propriétés fortement expansives selon la loi de Riecke.

La chronologie du processus d'expansion dû à la formation différée de l'ettringite fait encore l'objet de recherche et de controverses, en particulier au niveau de la localisation du gonflement. Il existe deux approches pour expliquer le mécanisme d'expansion. La première suppose une expansion provoquée par la croissance cristalline des cristaux qui précipitent d'abord sans générer des contraintes dans les pores existants et aux interfaces pâte/granulats, puis exercent une pression sur leur entourage par la croissance successive des cristaux [Diamond, 1996]. Dans la deuxième [Scrivener et Taylor, 1993 ; Scherer, 2002], le mécanisme d'expansion fait intervenir un gonflement isotrope de la pâte de ciment dû à la formation d'ettringite microcristalline au niveau des sites réactifs, où règnent vraisemblablement des conditions de sursaturations locales extrêmement élevées et quasi-instantanées. Ces sursaturations provoquent la précipitation rapide de l'ettringite mal cristallisée qui développe alors ponctuellement des pressions élevées. D'après cette approche, l'ettringite formée aux interfaces pâte/granulats serait issue de la dissolution des petits cristaux contenus dans la pâte selon le principe de mûrissement d'Oswald.

Les deux mécanismes proposés sont fondés sur de nombreuses observations et ne peuvent pas être rejetés. Il est probable que les deux hypothèses soient valables, c'est-à-dire que, dans certains cas, le gonflement pourrait être induit par l'expansion provoquée par la formation d'ettringite dans la pâte de ciment et que, dans d'autres cas, elle pourrait l'être par la croissance cristalline de l'ettringite aux interfaces pâte/granulats. De nos observations réalisées au microscope électronique à balayage, il apparaît que l'ettringite massive et mal cristallisée se situe principalement aux interfaces pâte de ciment/granulats (fig. 12).

Composition minéralogique des bétons étudiés

À partir des données fournies par les analyses chimiques, thermogravimétriques ainsi que des informations obtenues par diffractométrie des rayons X, le programme « Minéraux » permet de déterminer la composition minéralogique quantitative des bétons :

• dosage en ciment exprimé en pourcentage par rapport à l'ensemble du béton ;

• quantité des différentes espèces minérales de granulats : dolomite, calcite, résidu insoluble (quartz et silicates).



Fig. 12 - Localisation de l'ettringite massive à l'interface pâte/granulats, grossissement = 300 (MEB – électrons rétrodiffusés).

Les résultats sont présentés sous une forme simplifiée dans le tableau I.

% massique	Pont « A »	Pont « B »	Pont « C »	Pont « D »	Pont « E »
Granulats calcaires	1,5	0	33	0	11
Granulats siliceux	70	70	42	73	62
Eau	6,2	9,2	5,1	6,1	6,5
Ciment anhydre	18,8	20,0	18,4	17,8	18,7

 TABLEAU I

 Composition minéralogique simplifiée quantitative des bétons

Excepté pour le pont « C », les granulats de ces bétons sont essentiellement issus de roches siliceuses ou silicatées comportant comme minéraux principaux des quartz et des feldspaths orthoses. Les minéraux secondaires sont des plagioclases et des micas.

Les dosages en ciment sont calculés à partir de la masse volumique apparente des bétons et sont rassemblés dans le tableau II. Ces dosages sont relativement élevés et voisins de 400 kg/m³. En outre, les bétons ont une porosité qui varie entre 15 et 19 %, caractéristique d'un béton de faible compacité. Cela se traduit alors par une perméabilité élevée qui facilite les transferts de fluides liquides ou gazeux au sein du matériau.

TABLEAU II	
Dosage en ciment et porosité des bétons	

	Pont « A »	Pont « B »	Pont « C »	Pont « D »	Pont « E »
Masse volumique (g/cm ³)	2,28	2,14	2,21	2,14	2,20
Porosité (%)	15,3	19,2	17,3	18,6	16,2
Dosage en ciment (kg/m ³)	430	430	400	380	410

À partir des renseignements recueillis dans les dossiers d'archives (date de construction, catégorie de ciment, usine, etc.), la composition chimique des liants ayant servi à la construction de l'ouvrage a été obtenue en utilisant la banque de données sur les ciments du Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (tableau III). La composition potentielle des ciments a été calculée à partir de la formule de Bogue. Toutefois, certaines précautions ont été prises afin d'obtenir une composition potentielle fiable. En effet, nous avons pris en compte la silice hydraulique, la chaux libre et le carbonate de calcium présents dans le ciment. Cela évite alors de conduire à des résultats aberrants sur la répartition entre les deux silicates (C_3S et C_2S) [Deloye, 1991]. Les résultats sont présentés dans le tableau IV.

Les bétons des ponts « A », « C » et « E » ont été formulés avec un ciment Portland sans ajout, de type CEM I. Le béton du pont « B » a été réalisé avec un ciment de type CPAL de l'époque. Aujourd'hui, ce liant serait classé dans la catégorie CEM II/A. Il contient entre 10 et 15 % de laitier de haut fourneau. Dans ces conditions, le calcul de Bogue a été appliqué uniquement à la partie clinker du liant. Enfin, le béton du pont « D » est à base d'un ciment Portland avec un filler calcaire dont la teneur avoisine 10 %. Il appartient donc à la catégorie des CEM II/A. La composition minéralogique du ciment a été déterminée après avoir déduit la partie calcaire du liant.

Les compositions potentielles des ciments sont relativement similaires, excepté pour le liant du pont A. La faible teneur en silicate tricalcique du ciment A peut s'expliquer par la présence d'une quantité élevée de chaux libre. Par ailleurs, la précision du calcul de l'aluminate tricalcique risque d'être affectée par les méthodes analytiques de l'époque. En effet, les sesquioxydes (Al₂O₃, Fe₂O₃,

TABLEAU III Composition chimique des ciments ayant servi à la formulation des bétons

	Pont « A »	Pont « B »	Pont « C »	Pont « D »	Pont « E »
SiO ₂	19,8	23,0	20,5	21,4	21,0
Al ₂ O ₃	6,0	7,0	5,3	5,4	5,0
Fe ₂ O ₃	2,8	3,1	2,5	4,4	3,0
CaO	63,0	59,0	64,5	64,0	65,0
MgO	1,2	1,6	1,1	1,0	1,6
Na ₂ O	0,2	0,3	0,3	0,3	0,1
K ₂ O	0,6	1,1	1,2	1,2	0,8
SO ₃	2,5	2,7	2,6	2,5	2,8
Catégorie de ciment	CPA CEM I	CPAL CEM II/A	CPA 55R CEM I	CPJ 55 CEM II/A	CPA 55R CEM I

TABLEAU IV

Composition potentielle selon Bogue des ciments ou des clinkers ayant servi à la formulation des bétons

% massique	Ciment du pont « A »	Clinker du pont « B »	Ciment du pont « C »	Clinker du pont « D »	Ciment du pont « E »
C ₃ S	40,6	49,8	51,0	48,3	50,0
C ₂ S	26,1	18,6	20,3	24,9	22,5
C ₃ A	11,2	9,6	9,8	7,0	8,2
C ₄ AF	8,5	9,4	7,6	13,4	9,1
Gypse	5,4	5,8	5,6	5,4	6,0
Chaux libre	2,5	1,0	1,0	1,0	1,0
Carbonate de calcium	1,7	2,3	2,3	0	2,3
Rappel de la notation cimentière : C = CaO, S = SiO ₂ , A = Al ₂ O ₃ , F = Fe ₂ O ₃ , H = H ₂ O et \overline{S} = SO ₃ .					

 TiO_2) étaient déterminés par précipitation et dosés globalement par gravimétrie. L'oxyde d'aluminium était ensuite obtenu par différence avec les incidences dues aux erreurs faites sur les dosages de Fe₂O₃ et TiO₂.

Recherche de l'origine de l'activité sulfatique

Comme nous l'avons vu précédemment, les cinq bétons étudiés ne sont pas atteints par une réaction alcali-silice, mais essentiellement par une activité sulfatique très développée. Cette réaction peut expliquer l'origine des désordres observés sur les ouvrages. Toutefois, la question de l'origine des néoformations d'ettringite reste posée.

En effet, la précipitation massive d'ettringite nécessite, entre autres, la mobilisation en quantité importante de sulfates. Ce phénomène peut alors avoir plusieurs origines :

- un apport extérieur au béton ;
- des granulats riches en pyrite qui, en s'altérant, sont susceptibles de libérer des ions sulfate dans la solution interstitielle du béton ;
- une remobilisation des sulfates initialement contenus dans la matrice cimentaire.

Environnement extérieur de l'ouvrage

Les pièces en béton étudiées ne sont pas au contact direct d'un sol, ce qui élimine ce risque d'apport extérieur en sulfates. Pour les bétons des ponts « B », « D » et « E », un apport en sulfates par le milieu liquide a été écarté après analyse de l'eau.

Par ailleurs, aucun front d'attaque du matériau par une réaction sulfatique n'a été observé lors des examens au microscope électronique à balayage. L'ettringite apparaît d'ailleurs comme plus développée en profondeur qu'à la surface des carottes analysées. De plus, les bilans des calculs minéralogiques ne laissent pas apparaître un excès de sulfates par rapport à la masse totale du béton, excès qui indiquerait alors un apport externe en sulfates ou une oxydation des pyrites contenues dans les granulats.

Compte tenu de ce qui précède, l'activité sulfatique ne peut pas avoir une origine externe au béton ; il s'agit donc d'une réaction interne ne faisant intervenir que des composants mêmes de la matrice cimentaire.

Composants du béton

Certains granulats renferment parfois des sulfures de fer, en particulier sous forme de pyrite FeS₂, qui sont susceptibles de s'oxyder en présence d'une eau chargée en oxygène. La présence de pyrite dans les granulats n'a été décelée, ni par les examens microscopiques, ni par les analyses thermiques ; cette hypothèse peut donc être également écartée pour l'ensemble des bétons faisant partie de l'étude.

Les sulfates peuvent aussi provenir d'une remobilisation du soufre initialement contenu dans la matrice cimentaire, par un processus de dissolution-reprécipitation de l'ettringite d'hydratation précoce provoqué par un flux de lixiviation [Adenot, 1992]. Toutefois, lors de l'attaque d'un béton par des eaux pures, l'ettringite, composé très peu soluble, sera attaquée plus tardivement lorsqu'une partie de la chaux sera lessivée et lorsque la composition de la solution interstitielle du béton ne sera plus fixée par l'équilibre avec la portlandite. Or, les examens microscopiques montrent que les plaquettes de portlandite n'ont pas subi de dissolution partielle. De plus, on n'observe pas de phénomène de « zonation » de la phase solide de la matrice cimentaire, où chaque zone minéralogique serait délimitée par des fronts de dissolution ou de précipitation. Par ailleurs, l'ettringite mal cristallisée et expansive se rencontre préférentiellement au cœur du béton.

Une autre cause de remobilisation du soufre peut être attribuée aux sulfates du ciment qui n'ont pas pu réagir complètement lors de son hydratation ou qui résultent de la décomposition partielle de l'ettringite d'hydratation précoce suite à un échauffement important du matériau. Cette dernière hypothèse peut être envisagée dans le cas de nos bétons, compte tenu des risques d'élévation importante de la température dans les parties d'ouvrages analysées.

Estimation de l'élévation finale de température des bétons au jeune âge

Depuis plusieurs années, la modélisation du comportement du béton au jeune âge est un problème industriel majeur et un sujet de recherche en France et à l'étranger [Acker, 1983, 1985, 1986; Emborg, 1984; Singh, 1985; etc.]. Les problèmes rencontrés aussi bien en préfabrication que de la fissuration de retrait thermique dans les pièces coulées en place furent à l'origine de ces recherches. De nos jours, la conception de projets exceptionnels par la dimension des pièces rendent nécessaire l'étude des températures et des contraintes générées dans le béton au jeune âge.

Le paramètre température est primordial dans la formation différée de l'ettringite. Il est donc essentiel de déterminer l'élévation de température au sein des bétons pendant leur prise. Nous sommes partis de l'hypothèse que l'élévation de température d'une pièce en béton de grande masse peut être estimée par son élévation de température en conditions adiabatiques. Son estimation revient à calculer la quantité de chaleur dégagée au cours de l'hydratation des ciments.

Détermination de la chaleur d'hydratation du ciment

Nous ne disposons pas de mesures calorimétriques réalisées sur les ciments utilisés dans les bétons étudiés. Il est donc nécessaire d'estimer la chaleur d'hydratation par un autre moyen. La méthode la plus couramment utilisée est fondée sur la composition en phases (C₃S, C₂S, C₃A et C₄AF) du

ciment. Elle consiste à faire l'hypothèse que chacune des phases principales du ciment possède une chaleur d'hydratation massique propre et qu'il n'y a pas d'interaction entre ces différentes phases lorsqu'elles s'hydratent simultanément. La démarche que nous avons utilisée s'inspire alors des travaux de Waller [Waller, 1993, 1999].

La chaleur d'hydratation de chaque ciment a été estimée à l'aide de sa composition minéralogique donnée dans le tableau V. Pour les ciments contenant des constituants secondaires (laitier de haut fourneau ou fillers calcaires), nous avons considéré ces phases comme inertes au jeune âge de l'hydratation.

La chaleur d'hydratation du ciment est alors égale à la somme des chaleurs dégagées par chacune des phases minérales.

$$q_c = \sum \alpha_i q_i$$

où

> α_i représente la proportion massique de la phase i dans le ciment (en g/g) ;

> q_i est la chaleur massique d'hydratation de la phase i (en J/g).

Pour les chaleurs massiques d'hydratation des phases intervenant dans le calcul, nous avons adopté les valeurs retenues par Waller [Waller, 1999] qui a repris les hypothèses suivantes :

- C₃A s'hydrate essentiellement en C₄A $\overline{S}H_{12}$;
- C_4AF s'hydrate en $C_3(A,F)H_6$.

TABLEAU V

Chaleurs d'hydratation moyennes des phases pures [Waller, 1999]

Phases minérales	Chaleur d'hydratation (J/g)		
C ₃ S	510		
C ₂ S	260		
C ₃ A	1 100		
C ₄ AF	410		

Tous les constituants du ciment n'apportent pas la même contribution en terme de dégagement de chaleur. On notera l'influence du C_3A et du C_3S . En général, ce dernier étant prépondérant dans les ciments, la chaleur d'hydratation en sera largement dépendante. Par ailleurs, la teneur en C_3A varie d'un ciment à l'autre, ce qui aura des conséquences directes sur la chaleur dégagée lors de l'hydratation. Les valeurs calculées de la chaleur d'hydratation des ciments sont rassemblées dans le tableau VI. Les incertitudes sur les valeurs des phases pures (C_3S , C_2S , C_3A et C_4AF) conduisent à une incertitude d'environ 7% sur la valeur calculée de la chaleur d'hydratation massique du ciment [Waller, 1993].

TABLEAU VI

Chaleurs d'hydratation des ciments utilisés dans les bétons

Ciment	Chaleur d'hydratation (J/g)
Pont « A »	430 ± 30*
Pont « B »	445 ± 30
Pont « C »	450 ± 30
Pont « D »	445 ± 30
Pont « E »	440 ± 30

* Cette valeur peut être sous ou surestimée compte tenu des imprécisions analytiques de l'époque pour la détermination de la teneur en C₃A.

L'ordre de grandeur de la chaleur d'hydratation d'un ciment Portland artificiel est de quelques centaines de joule par gramme de ciment hydraté et généralement dans la fourchette de 350 à 450 J/g. Les ciments utilisés pour la construction de ces ouvrages appartiennent donc à la catégorie des ciments à forte chaleur d'hydratation (valeur moyenne de 440 J/g).

Détermination de la capacité thermique du béton

La capacité thermique du béton (Cth) est égale au nombre de joules nécessaire pour en élever la température de 1°C. Elle intervient dans le calcul de l'élévation de température du béton :

$$\Delta T \int_{t=0}^{\infty} dT = \int_{t=0}^{\infty} \delta Q / C^{th}$$

La grande variabilité de la capacité thermique des bétons, due à des compositions et à des natures de matériaux différents, ne permet pas de considérer qu'il existe une valeur moyenne pour tout béton. C'est pourquoi elle a été évaluée à partir de la composition du béton, en appliquant le modèle linéaire proposé par Jolicoeur [Jolicoeur et al., 1994].

$$C^{\text{th}} = m_c C_c^{\text{th}} + m_g C_g^{\text{th}} + m_e C_e^{\text{th}} - m_{eli\acute{e}e} (C_e^{\text{th}} - C_{eli\acute{e}}^{\text{th}})$$

avec

- > m_c, m_g et m_e = masses de ciment, de granulats et d'eau entrant dans la composition du béton ;
- \rightarrow m_e = masse d'eau liée aux hydrates ;

Cth_c = capacité thermique massique du ciment = 0,75 J/°C/g ;
 Cth_g = capacité thermique massique des granulats (siliceux = 0,75 J/°C/g, calcaire = 0,84 J/°C/g, silico-calcaire = 0,80 J/°C/g) ;

Cth_e = capacité thermique massique de l'eau = 4,18 J/°C/g;
 Cth_{eliée} = capacité thermique massique de l'eau liée aux hydrates = 2,18 J/°C/g.

Le terme négatif du modèle permet de prendre en compte la diminution de la capacité thermique du béton qui résulte du degré d'avancement des réactions d'hydratation. La quantité moyenne d'eau liée aux hydrates a été estimée en prenant comme valeur la moitié de la masse d'eau liée à la fin de la période de durcissement du béton. Nous avons supposé que le degré d'hydratation du ciment était de 0,8 et que l'eau liée correspondait à 23 % du ciment hydraté. Le degré d'hydratation final du ciment dépend essentiellement de la valeur du rapport E/C qui est en moyenne de 0,5 pour les bétons étudiés. D'autres paramètres, comme la nature ou la finesse du ciment, influent également, mais dans une moindre mesure.

Les résultats du calcul de l'élévation de température des bétons en condition adiabatique sont présentées dans le tableau VII. Il est important de rappeler que le modèle utilisé donne une prévision de l'élévation finale de la température du béton. On ne s'est pas attaché à l'étude de la cinétique de production de chaleur dans les bétons. Celle-ci se déduit relativement bien de la cinétique d'hydratation du ciment. Toutefois, cette information n'était pas disponible dans les dossiers d'archives des ouvrages.

TABLEAU VII

Estimation de l'élévation de température finale correspondant à l'échauffement des bétons en conditions adiabatiques

Béton	∆ T (°C)
Pont « A »	62 ± 4*
Pont « B »	62 ± 4
Pont « C »	61 ± 4
Pont « D »	55 ± 3
Pont « E »	63 ± 4

* Cette valeur peut être sous ou sur-estimée compte tenu des imprécisions analytiques de l'époque pour la détermination de la teneur en C₃A.

L'échauffement ΔT des bétons étudiés est important (en moyenne 61 °C), excepté pour celui du pont D qui comporte un dosage en ciment plus faible et un liant contenant des fillers calcaires. Pour l'un des bétons (pont E), cet échauffement a été vérifié et validé par un essai adiabatique sur formule de béton reconstituée avec des matériaux identiques à ceux utilisés à l'époque. La température maximale atteinte dans les pièces massives correspondra à la température initiale du béton additionnée de ΔT . En première approche, on peut considérer la température initiale du béton comme égale à la température extérieure. Pour des bétonnages en été et en prenant une température extérieure moyenne de 20 °C, on est alors susceptible d'atteindre au cœur du matériau des températures de l'ordre de 80 °C si toutes les dispositions des règles de l'art ne sont pas prises pour limiter la quantité de chaleur dégagée.

Recherche des facteurs déterminants de la formation différée de l'ettringite

La formation différée de l'ettringite n'est susceptible de se produire à long terme que dans certaines conditions spécifiques. La probabilité d'apparition est fortement liée à certains paramètres que l'on peut classer en quatre groupes :

- paramètres liés à la température,
- paramètres liés au ciment,
- paramètres liés au béton,
- paramètres liés à l'environnement.

Parmi les cinq ponts étudiés, il apparaît alors systématiquement des facteurs communs qui sont d'ailleurs souvent cités dans la littérature. Ces données sont rassemblées dans le tableau VIII.

TABLEAU VIII

Étude comparative des différents facteurs déterminants de la formation différée de l'ettringite rencontrés dans les cinq ponts expertisés

	Pont « A »	Pont « B »	Pont « C »	Pont « D »	Pont « E »
Paramètres liés à la température :					
 ΔT calculée (°C) 	62	62	61	55	63
 Période de bétonnage 	Août	Inconnue	Août/septembre	Juillet/août	Août/septembre
 Température maximale probable atteinte (°C) 	> 82	> 82	> 81	> 75	> 83
Paramètres liés					
au ciment :					
• Na ₂ O équivalent 1	0,60	1,02	1,09	1,08	0,63
(% massique)					
 SO₃ (% massique) 	2,5	2,7	2,6	2,5	2,8
 C₃A (% massique) 	11,2	9,6	9,8	7,0	8,2
• SO ₃ /Al ₂ O ₃ 2	0,42	0,39	0,49	0,46	0,56
 (SO₃)²/Al₂O₃ 	1,49	1,46	1,83	2,40	2,53
(% massique)					
Paramètres liés au béton :					
 Dosage en ciment (kg/m³) 	430 🕘	430	400	380	410
 Nature des granulats 	Siliceux	Siliceux	Silico-calcaire	Siliceux	Silico-calcaire
 Rapport E/C S 	0,50	0,50	0,47	0,54	0,46
Paramètre lié à	Problème	Absence de	Zone humide	Zones de	Zones de
l'environnement :	étanchéité	drainage		marnage et	marnage et
 Humidité 				zones	zones
				immergées	immergées

• % Na_2O équivalent = % Na_2O + 0,658 % K_2O .

- **2** Al_2O_3 total.
- \bullet Al₂O₃ du C3A.

3 Surdosage en ciment par rapport au cahier des charges.

S Valeur nominale.

L'exploitation de ces informations permet alors de mieux identifier les facteurs déterminants et leurs valeurs critiques, *a priori* indispensables au développement de la formation différée de l'ettringite.

Paramètres liés à la température

Les désordres observés ne concernent pas la totalité de l'ouvrage, mais essentiellement certaines pièces massives. L'élévation de la température au sein de la masse de béton varie en fonction de la composition minéralogique du béton, de la déperdition de chaleur par les coffrages, mais aussi de la température extérieure et de la température initiale du matériau. Or, ces bétons ont été mis en œuvre pendant la période estivale, c'est-à-dire vraisemblablement à des températures supérieures à 20 °C.

Par ailleurs, le calcul des élévations finales de température des bétons en conditions adiabatiques aboutit à des valeurs dont la moyenne est de 61 °C. Elles résultent de l'utilisation de ciment fortement exothermique et d'un dosage en ciment élevé (en particulier, un surdosage en ciment de 100 kg/m³ pour le béton A). De plus, des ciments à prise rapide ont été utilisés pour deux des ponts étudiés (C et E). Deux autres bétons ont été formulés avec des ciments à constituants secondaires, l'un avec du laitier de haut fourneau, l'autre avec des fillers calcaires. Toutefois, les teneurs en constituants secondaires sont faibles (< 10 %), ce qui masque en réalité de véritables ciments Portland artificiels. En prenant en compte une température extérieure moyenne de 20 °C, les températures au cœur des structures massives peuvent atteindre près de 80 °C.

La prise du béton se fait alors à chaud et un retrait plus ou moins intense a pu se produire en raison de gradients thermiques lors du refroidissement, qui induisent des contraintes mécaniques. Cellesci sont d'une intensité telle qu'elles peuvent conduire à la fissuration des pièces. Cela a d'ailleurs été constaté au moins pour l'un des ponts étudiés (pont « D »). Cette fissuration affecte la durabilité puisqu'elle facilite les transferts de matières (eau, ions) au sein du matériau. Il s'agit là d'un facteur propice à l'accélération des mécanismes nécessaires à la formation différée de l'ettringite.

Paramètres liés au ciment

Le rôle des alcalins du ciment est primordial dans le développement de la réaction [Divet, 2001]. Par contre, il n'existe pas de teneurs critiques parfaitement établies et validées. Les ciments mis en cause dans les ponts expertisés ont des teneurs en Na₂O équivalent supérieures à 0,6 % par rapport à la masse totale de ciment anhydre et atteignent même des valeurs supérieures à 1 % pour trois bétons.

Certains auteurs [Heinz et *al.*, 1989 ; Day, 1992] ont évalué le potentiel de réactivité des bétons visà-vis de la formation différée de l'ettringite à partir du rapport SO_3/Al_2O_3 (si ce rapport est supérieur à 0,7 alors le béton est réactif) ou du rapport SO_3^2/Al_2O_3 (seuil critique fixé à 2). L'application aux bétons étudiés ne met pas en évidence un impact de ces rapports sur le développement de cette pathologie.

En revanche, cette étude montre que les ciments utilisés ne contiennent pas systématiquement des teneurs en C_3A et SO₃ très élevées. Toutefois, ils n'appartiennent pas à la catégorie des ciments pour travaux à haute teneur en sulfate (norme XP P 15-319) puisque leur teneur en C_3A est toujours supérieure à 5 %.

Paramètres liés au béton

Il s'agit toujours de bétons fortement dosés en ciment. Les granulats du béton constitutif des cinq ponts sont principalement siliceux, exceptés ceux des bétons du pont « C » et du pont « E » qui comportent des silico-calcaires. Ces résultats appuient les travaux de Grattan-Bellew et Yang, qui ont montré lors d'essais accélérés des gonflements plus élevés pour les matériaux formulés avec des granulats siliceux [Grattan-Bellew et *al.*, 1998 ; Yang et *al.*, 1999]. Toutefois, les récents travaux de Kelham et Pavoine [Kelham, 2002 ; Pavoine, 2003] indiquent que les granulats calcaires ne limitent pas l'expansion à long terme du béton, mais augmentent la période d'incubation. Ce phénomène s'explique vraisemblablement par l'existence d'une interface pâte de ciment/granulats calcaires moins poreuse qui ralentit les transports de matière.

Enfin, les rapports E/C sont relativement élevés et de l'ordre de 0,5. Les porosités mesurées peuvent parfois atteindre 19 %. Cela conduit vraisemblablement à une perméabilité suffisamment élevée pour faciliter les transferts au sein du matériau. Par contre, la porosité induite ne permet pas de servir

de vase d'expansion à la formation d'ettringite car les phénomènes (diffusion des ions et précipitation de l'ettringite) se produisent vraisemblablement à l'échelle locale.

Paramètre lié à l'environnement

Une des conditions indispensables au développement de la réaction est la présence d'une humidité suffisamment élevée. Elle peut provenir, et c'est le cas des ouvrages étudiés, d'un défaut d'étanchéité, de l'absence de drainage ou d'une partie d'ouvrage immergée ou soumise au marnage d'un fleuve. Dans ce dernier cas, des cycles d'humidification/séchage engendrés par le marnage paraissent accélérer la cinétique de la réaction. Il en résulte que d'importants désordres sont observés en moins de dix ans sur certains ouvrages.

Conclusion

Le premier objectif de cette étude était de déterminer les causes des altérations affectant les cinq ponts suspects. Les examens minéralogiques réalisés à partir d'une série de carottes mettent en évidence la présence d'une pathologie liée essentiellement à des néoformations ettringitiques. La coexistence d'une réaction alcali-silice n'a pas été observée. Les effets expansifs de l'ettringite sont très marqués et affectent toute la masse du béton (cœur et peau).

Les résultats des investigations convergent vers l'hypothèse d'une activité sulfatique d'origine endogène, qui résulte d'une remobilisation des sulfates initialement contenus dans la matrice cimentaire. De plus, l'estimation de l'élévation finale de température des bétons montre que les désordres observés peuvent être expliqués par le mécanisme de la formation différée de l'ettringite. Par conséquent, cette pathologie consécutive à un échauffement du matériau ne concerne pas uniquement les bétons traités thermiquement, mais peut aussi se rencontrer dans les ouvrages ou les pièces en béton de grande masse coulés *in situ*. Nos précédents travaux [Divet et *al.*, 1998] ont montré des différences importantes entre les bétons étuvés et les bétons de grande masse. La durée de la période de latence et de maintien du béton à haute température est plus élevée pour les bétons de grande masse ; en effet, il faut plusieurs heures avant d'avoir un échauffement significatif de ces bétons. De même, la chaleur s'évacue lentement pendant plusieurs dizaines d'heures. Dans ce cas, le cycle thermique des pièces massives apparaît comme plus sévère vis-à-vis de la formation différée de l'ettringite (maintien à des températures supérieures à 70 °C pendant plusieurs jours au lieu de 4 à 12 heures pour la préfabrication).

Le second objectif était de rechercher les paramètres simultanément présents et nécessaires au développement de la formation différée de l'ettringite. Les mécanismes fondamentaux de cette pathologie ne sont pas encore entièrement élucidés, mais il semble clair que la présence de plusieurs facteurs soit indispensable :

- l'échauffement important des bétons (de l'ordre de 80 °C) résulte de plusieurs phénomènes. Il s'agit de bétons de grande masse qui auraient nécessité l'utilisation de ciments moins exothermiques. Ces bétons ont été coulés en période estivale et comportent un fort dosage en ciment (voisin de 400 kg/m³);
- les ciments utilisés contiennent des teneurs en alcalins supérieures à 0,6 % Na₂O équivalent. Les teneurs en SO₃ et C₃A ne sont pas excessivement élevées (SO₃ de l'ordre de 2,6 % et C₃A compris entre 7 et 11 %). Néanmoins, les ciments employés dans ces ouvrages n'appartiennent pas à la catégorie des ciments pour travaux en eaux à haute teneur en sulfates (C₃A < 5 %);

• la nature des granulats semble également jouer un rôle prépondérant. Les granulats siliceux, en particulier de type quartz, favorisent vraisemblablement la formation d'ettringite potentiellement expansive au niveau de l'interface pâte/granulats ;

• des cycles d'humidification/séchage ou des conditions d'humidité relativement élevée jouent également un rôle.

Trois conditions sont nécessaires pour initier une réaction alcali-silice : des granulats contenant de la silice réactive, des alcalins et des conditions d'humidité élevées. Dans le cas de la formation différée de l'ettringite, il apparaît que le nombre de facteurs indispensables au développement de la réaction est plus élevé. En effet, cinq à six facteurs sont déterminants : la température, les alcalins, les teneurs en SO₃ et en C₃A du ciment, la nature des granulats et des conditions d'humidité élevées. La conjonction de six facteurs limite vraisemblablement le nombre d'ouvrages actuellement touchés par cette pathologie.

Remerciements. L'auteur tient à remercier les différentes personnes qui ont contribué à ce travail par les discussions ou leur participation aux investigations en laboratoire, en particulier B. Godart, V. Waller, G. Platret, E. Massieu, A. Plantet, Ph. Touzé, V. Mondon, B. Zitoun, V. Randazzo et J.-Ph. Davy.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

ACKER P., FOUCRIER C., DELUDE P., Simulation des températures dans les éléments en béton en cours de fabrication – Programme BITEX, *Bulletin de liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées*, **126**, **1983**, pp. 115-123.

ACKER P., FOUCRIER C., MALIER Y., Temperature-related mechanical effects in concrete elements and optimisation of the manufacture, process *ACI symposium on properties of concrete at early ages*, Chicago, **1985**, pp. 33-47.

ACKER P., Effets thermiques dans les bétons en cours de fabrication et application aux ouvrages d'art (de nouveaux outils pour une optimisation simultanée des coûts et de la qualité), *Annales de l'ITBTP*, **442**, **1986**, pp. 61-80.

ADENOT F., Durabilité du béton : caractérisation et modélisation des processus physiques et chimiques de dégradation du ciment, Thèse de l'université d'Orléans, **1992**, 224 p.

AFPC-AFREM, Détermination de la masse volumique apparente et de la porosité accessible à l'eau, Compterendu des journées techniques AFPC-AFREM Durabilité des bétons, Méthodes recommandées pour la mesure des grandeurs associées à la durabilité, **1997**, pp. 121-124.

DAY Robert L., The effect of secondary ettringite formation on the durability of concrete : a literature analysis, *Research and development Bulletin RD108T*, Portland Cement Association, Skokie, Ill, **1992**, 115 p.

DELOYE F.-X., Utilisation du calcul automatique en analyse minéralogique quantitative, *Bulletin de liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées*, **89**, **1977**, pp. 33-38.

DELOYE F.-X., Du bon usage de la formule de Bogue, *Bulletin de liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées*, **176**, **1991**, pp. 81-85.

DIAMOND S., Delayed Ettringite Formation – Processes and Problems, *Cement and Concret Composites*, vol. 18, **1996**, pp. 205-215.

DIVET L., GUERRIER F., LE MESTRE G., Existe-t-il un risque de développement d'une activité sulfatique d'origine endogène dans les pièces en béton de grande masse ? Le cas du pont d'Ondes (Haute-Garonne), *Bulletin des laboratoires des Ponts et Chaussées*, **213**, **1998**, pp. 59-72.

DIVET L., Les réactions sulfatiques internes au béton : contribution à l'étude des mécanismes de la formation différée de l'ettringite, *Études et Recherches des Laboratoires des Ponts et Chaussées, Ouvrages d'art*, **OA 40, 2001,** 227 p.

EMBORG M., BERNANDER S., Temperature stresses in early age concrete due to hydration, *Nordic Concrete Recearch*, **3**, **1984**.

GRATTAN-BELLEW P.-E., BEAUDOIN J.-J., VALLEE V.-G., Effect of aggregate particle size and composition on expansion of mortar bars due to delayed ettringite formation, *Cement and Concrete Research*, vol. 28, **8**, **1998**, pp. 1147-1156.

HEINZ D., LUDWIG U., Mechanism of subsequent ettringite formation in mortars and concretes after heat treatment, *Proceedings of the 8th International Congress on the chemistry of cement*, vol. V, Rio de Janeiro, Brésil, **1986**, pp. 1-6.

HEINZ D., LUDWIG U., Mechanism of secondary ettringite formation in mortars and concretes subjected to heat treatment, *American Concr. Inst.*, SP 100-105, Detroit, *1987*, pp. 2059-2071.

HEINZ D., LUDWIG U., RUDIGER I., Delayed ettringite formation in heat treated mortars and concretes, *Concrete Precasting Plant and Technology*, **Issue 11/1989**, **1989**, pp. 56-61.

HOBBS D.W., Expansion and cracking of concrete attributed to delayed ettringite formation, In *Proceedings* of a 'technical Session – Ettringite : The sometimes host of destruction (Editor : Bernard Elvin), American Concrete Institute, Seattle, Washington, April 1977, **SP-177, 1999**, pp. 151-181.

JOLICOEUR C., BILODEAU J., SIMARD M.-A., Étude calorimétrique de l'hydratation d'un ciment – Détermination de l'énergie d'activation, Rapport d'étape, communication privée, **1994.**

KELHAM S., Effect of cement parameters on expansion associated with DEF, *Workshop on internal sulfate attack and Delayed Ettringite Formation*, RILEM TC ISA, 4-6 septembre **2002**, Villars, Suisse.

LONGUET P., DELOYE F.-X., Exploitation des données apportées par l'analyse du béton durci, *Annales de l'ITBTP*, **417**, septembre **1983**, série béton 216, pp. 15-31.

MILLET J., BERNARD A., HOMMEY R., POINDEFERT A., Sur le dosage de l'ettringite dans les pâtes de ciment et les mortiers, *Bulletin de liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées*, **109**, **1980**, pp. 91-95.

PAVOINE A., *Evaluation du potentiel de réactivité des bétons vis-à-vis de la formation différée de l'ettringite*, Thèse de l'université Pierre et Marie Curie – Paris VI, 28 mai **2003**, 226 p.

QUILLIN, Delayed ettringite formation : in-situ concrete *BRE Report, Centre for Concrete Construction*, June **2001**, pp. 1-8.

SCHERER G. W., Factors affecting crystallization pressure, *Workshop on internal sulfate attack and Delayed Ettringite Formation*, RILEM TC ISA, 4-6 septembre **2002**, Villars, Suisse.

SINGH M., State-of-art finite element computer programs for thermal analysis of mass concrete structures, *Civil Engineering for Practising and Design Engineers*, vol. 4, **1985**, pp. 129-136.

SCRIVENER K., TAYLOR H., Delayed Ettringite Formation : a microstructural and microanalytical study, *Advances en Cement Research*, vol. 5, **20**, **1993**, pp. 139-149.

WALLER V., Modélisation de l'élévation de température d'un béton au cours de sa prise en conditions adiabatiques en fonction de sa formulation, Mémoire de DEA, ENS Cachan, LCPC, juillet **1993.**

WALLER V., Relations entre composition des bétons, exothermie en cours de prise et résistance en compression, Thèse de l'ENPC, Paris, 11 janvier **1999**.

YANG R., LAWRENCE C.D., SHARP J.H., Effect of type of aggregate on delayed ettringite formation, *Advances in Cement Research*, vol. 11, **3**, **1999**, pp. 119-132.