

Comportement à long terme d'une liaison « Portland-Fondu »

Exemple d'un clavage à base d'un béton alumineux : le viaduc de l'avenue du Rhône à Annecy

RÉSUMÉ

Pour les opérations qui nécessitent un durcissement rapide du matériau, comme certains clavages, on est amené à mettre en œuvre du béton de ciment alumineux au contact des bétons traditionnels, à base de ciment Portland, déjà durcis. Compte tenu des caractéristiques chimiques des deux types de liant, la question du comportement à long terme d'une telle liaison peut se poser.

Le cas du viaduc de l'avenue du Rhône à Annecy, qui enjambe des voies SNCF électrifiées en 25 kV, donne une réponse à cette question grâce à une double expertise, effectuée par le Laboratoire central des Ponts et Chaussées et le Laboratoire central de Lafarge, seize ans après la mise en place d'un clavage en béton de ciment fondu.

Le présent article décrit les caractéristiques de l'ouvrage, les contraintes ayant entraîné le choix d'un béton alumineux pour le clavage des poutres, les conditions d'exécution de ce dernier, ainsi que le détail des prélèvements et des investigations effectués par les deux laboratoires.

Les conclusions montrent que la liaison « alumineux-portland » est stable à long terme, sous condition expresse que les règles de mise en œuvre du béton de ciment alumineux (qui sont rappelées) soient rigoureusement respectées.

MOTS CLÉS : 32 - Ciment alumineux - Ciment Portland - Béton hydraulique - Viaduc - Interface - Béton précontraint - France - Minéralogie - Long terme - Structure (physico-chim.) - Analyse chimique - Clavage.

François-Xavier DELOYE

Chef de la section chimie analytique
Service de chimie
Laboratoire central des Ponts et Chaussées

Bernard LORANG

Ingénieur ECS
Direction de la Prescription

Ron MONTGOMERY

Ingénieur
Lafarge Fondu International

Ivan MODERCIN

Ingénieur civil des Ponts et Chaussées
Division Ouvrages d'art
CETE d'Aix-en-Provence

Alain REYMOND

Ingénieur
Chef de section Ouvrages d'art
Laboratoire de la direction de l'Équipement de Haute-Savoie

Introduction

L'emploi du ciment alumineux, dans la réalisation partielle ou totale d'ouvrages d'art, obéit à des règles bien définies permettant d'assurer une mise en œuvre dans des conditions très satisfaisantes, tout en respectant les critères de qualité et de pérennité des bétons.

Dans de nombreux cas, que ce soit pour des travaux neufs ou des travaux d'entretien et de réparation, ce liant apporte par ses caractéristiques spécifiques, notamment de durcissement rapide, des solutions intéressantes pour des remises en service dans des délais réduits, afin de répondre à des contraintes spécifiques de phasages de chantiers tout en assurant les performances requises.

Ainsi, pour certaines opérations, on est amené à mettre en œuvre du béton de ciment alumineux au contact de bétons traditionnels déjà durcis à base de ciment Portland.

Il est bien connu que le ciment alumineux réagit par gâchage avec du ciment Portland pour produire des mélanges à prise et durcissement accélérés, mais aux caractéristiques mécaniques quelque peu amoindries, ce qui exclut cette association en béton de structure.

Par contre, le principe d'un contact de béton alumineux frais sur du béton de Portland durci est différent. De nombreux exemples, notamment dans des opérations de clavage de ponts ou de poutres, prouvent que ce genre d'utilisation conduit à des résultats tout à fait satisfaisants dans la pratique.

Compte tenu des caractéristiques chimiques respectives des ciments Portland et du ciment alumineux, la question a souvent été posée en terme de pérennité de l'interface « alumineux/Portland ».

L'étude d'une telle liaison au niveau d'un clavage a été entreprise sur un ouvrage soumis à des conditions normales d'utilisation.

Description générale de l'ouvrage

Le viaduc routier de l'avenue du Rhône à Annecy, proche de la gare SNCF, et enjambant le réseau ferroviaire, comporte, presque au droit des voies SNCF électrifiées, un clavage réalisé en béton de ciment alumineux fondu. Cet important ouvrage de près de 300 m de long comprend deux tabliers séparés, chacun formé d'une dalle continue précontrainte à deux nervures, reposant sur des piles (fig. 1).



Fig. 1 - Aspect général du viaduc de l'avenue du Rhône.

Chaque pile est constituée de deux pieux de diamètre 1 200 mm encastrés sur 6 m environ dans un substratum sableux couvert d'une couche de 15 à 25 m de limons compressibles. Ils supportent en élévation des poteaux de section elliptique.

Méthode d'exécution des tabliers

Les tabliers ont été construits à l'avancement d'Est en Ouest, par tronçons de deux travées. Les plans de reprise de bétonnage et de la précontrainte (par coupleurs) ont, évidemment, été placés aux foyers des travées.

La récurrence entre deux phases fut la suivante :

- bétonnage sur cintre de la phase (n) et mise en précontrainte de cette phase,
- démontage du cintre (n) et mise en place de la phase (n + 1),
- bétonnage de la phase (n + 1), clavage avec la phase (n) et mise en précontrainte de continuité.

Composition du béton

Le béton de la centrale BPE approvisionnant le chantier avait la composition suivante :

- Ciment : 400 kg CPA 400 CHIRON
- Sable 0/2,5 : 535 kg
- Gravier 2,5/6,3 : 367 kg
- Gravier 6,3/10 : 124 kg
- Gravier 8/18 : 868 kg

Phénomènes vibratoires sur voies SNCF

Comme on pouvait le craindre, selon l'avis du CETE, les passages de trains sous les travées III ont provoqué la vibration des piles de la phase I (travées I et II), entraînant par résonance celle du tablier de cette même phase.

L'amplitude des oscillations au plan de reprise était de 2 mm. Dans de telles conditions aucun clavage n'était possible, sauf entre minuit et 4 h du matin, seule période non circulée par les trains.

Procédure de clavage

Il fallait donc qu'en moins de quatre heures soient réalisées :

- la continuité du béton par un clavage de 20 MPa de résistance caractéristique minimale,
- la mise en tension de trois câbles 12 T 15, suffisants pour comprimer toute la section de reprise (sur les neuf armant chaque nervure).

Seul un béton au ciment alumineux pouvait répondre à ces contraintes [1].

Le clavage des travées en béton de ciment Portland au moyen d'un béton de « ciment Fondu » ayant été décidé, cette opération a été effectuée au mois d'octobre 1976.

Malgré les faibles quantités de béton à mettre en place (de l'ordre de 2 m^3 par nervure), plus du triple a été fabriqué en centrale pour assurer la précision du dosage et l'homogénéité du matériau.

La composition granulaire du béton de travée E 400 a été conservée, la teneur en ciment (alumineux) ayant été portée à 450 kg/m^3 , pour respecter le critère spécifique du E/C [2], tout en assurant une maniabilité suffisante pour la mise en place.

Ainsi la composition du béton de ciment Fondu a été la suivante :

- Ciment Fondu : 450 kg
- Sable 0-2,5 : 535 kg
- Gravier 2,5-6,3 : 367 kg
- Gravier 6,3-10 : 124 kg
- Gravier 8-18 : 868 kg
- Eau : 180 l

Après reprise du trafic SNCF, la mise en précontrainte totale a pu se poursuivre normalement sur une structure devenue monolithique (fig. 2).

En raison de l'utilisation de ciment alumineux, cet ouvrage a fait l'objet d'une surveillance particulière qui ne révéla aucun vice, qu'il soit d'aspect ou de fonctionnement mécanique.

Malgré ce comportement satisfaisant pendant près d'une décennie et demie, le principe d'une expertise comportant des carottages a été retenu à l'unanimité des parties intéressées, pour examiner les deux bétons et leur interface, et confirmer la bonne qualité apparente des clavages [3].

Les prélèvements d'échantillons

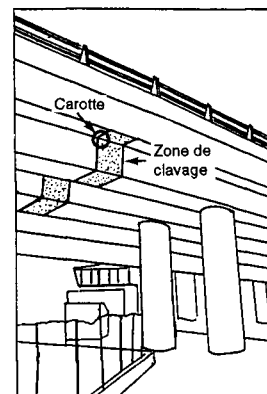
Sélection du site

Une visite préalable de l'ouvrage a permis de repérer et de déterminer les zones de prélèvement du béton sous le contrôle des services techniques de la ville d'Annecy, et de la division Ouvrages d'art du CETE d'Aix-en-Provence, en liaison avec la SNCF.

La proximité des clavages des deux travées et de la voie ferrée, avec caténaires sous tension, a conduit à faire une demande auprès de la direction des services techniques de la SNCF, pour prendre toutes les dispositions de sécurité nécessaires durant la période d'intervention.



Fig. 2 -
Zone et situation
des clavages au
ciment alumineux.



Les emplacements de carottage ont été choisis en sous-face du tablier à l'extérieur des nervures au niveau des goussets d'encorbellement, l'axe des carottes se situant à 12 cm des nervures.

Carottages

Réalisés le 18 juillet 1990 par l'entreprise spécialisée Zschokke, sous le contrôle du laboratoire de la DDE d'Annecy, des personnels SNCF et de Lafarge Fondu International, les prélèvements ont demandé un peu plus de temps que prévu pour les raisons suivantes :

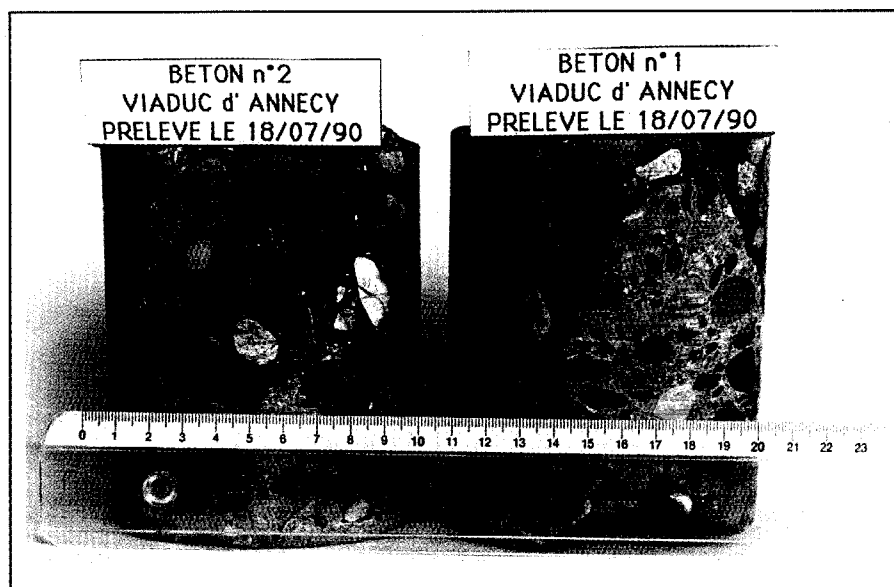
- difficultés d'accès, le long de la voie SNCF, du camion nacelle de 14 m de flèche, en raison notamment du respect impératif d'une distance minimale de 3 m entre les caténaires sous tension (25 kV) et tout élément du camion,
- difficulté du repérage des plans d'interface du fait d'un lissage superficiel en mortier de ragréage.

Après extraction, chaque carotte de diamètre 100 mm a été aussitôt enfermée dans un sac plastique et soigneusement repérée.

Cinq carottes correspondant à des bétons de 14 ans d'âge ont été prélevées : n° 1 - 2 - 3 - 4 et 3 bis, cette dernière étant prise dans une zone ne comportant que du béton de « ciment Fondu ».

Les carottes 1 et 4 ont été prélevées sur le tablier, où le béton de clavage a été coulé directement au contact du béton de travée.

Fig. 3 -
Aspect des carottes
montrant l'interface
Portland-Alumineux.



Les carottes 2 et 3 correspondent au clavage comportant un film de résine pour reprise de bétonnage.

Pour permettre des études parallèles et complémentaires, les carottes ont été réparties de la façon suivante :

- les carottes 1 et 2 au Laboratoire central Lafarge (fig. 3),
- les carottes 3 - 3 bis - 4 au Laboratoire central des Ponts et Chaussées, où seule la carotte 4, comportant un interface à vif entre béton de Portland et béton de ciment Fondu, a été étudiée.

Chaque laboratoire a traité les échantillons suivant sa méthode habituelle de travail.

Les analyses Lafarge

Investigations

Au laboratoire de recherches Lafarge à Viviers, les carottes 1 et 2 ont été traitées de la manière suivante :

- sciage suivant un plan normal à la trace de l'interface entre le béton de travée à base de ciment Portland et le béton de clavage au ciment Fondu,
- polissage de l'une des faces de sciage,
- examen en microscopie électronique à balayage (MEB) avec cartographie et analyse élémentaire par sonde en dispersion d'énergie du spectre X émis (EDAX), afin de localiser d'éventuels produits de dégradation,
- fracture de l'autre moitié de carotte au niveau de l'interface Portland-Fondu,
- examen de l'interface au MEB en électrons secondaires, afin de mettre en évidence une interaction éventuelle,
- prélèvement dans la masse de chaque type de

béton avec mesure de densité et porosité par pesée hydrostatique,

- analyse élémentaire par attaque à l'acide chlorhydrique à 20 % et analyse du filtrat. On obtient ainsi la part soluble du béton, c'est-à-dire le liant et les carbonates des granulats.

Résultats

- Les analyses chimiques et les mesures de densité/porosité permettent de calculer les dosages en ciment et d'estimer les E/C des bétons :

- béton de ciment Portland 15 % soit 395 kg/m^3 avec un $E/C = 0,45$

- béton de ciment Fondu 18,2 % soit 460 kg/m^3 avec un $E/C = 0,40$

- Les examens au MEB et les analyses EDAX indiquent que les granulats pour les deux bétons sont de nature silico-calcaire.

Ceci est confirmé par la teneur en CO_2 similaire pour les deux bétons (de l'ordre de 17 %), ce qui permet de dire que 50 % environ des granulats sont constitués par des carbonates, essentiellement du calcaire avec un peu de dolomie.

La bonne compacité du béton de « ciment Fondu » est bien visible sur les examens des sections polies (MEB) et confirmée par la porosité, qui présente une valeur très basse (3,9 %).

Ceci confirme que le dosage en ciment alumineux et le E/C ont été bien respectés pour obtenir un béton de qualité en conformité avec les règles en vigueur [4] et [5].

La technique de cartographie en Image X au MEB, a montré un phénomène de diffusion des ions aluminium du béton de « ciment Fondu » vers le béton de ciment Portland au niveau de l'interface des deux matériaux (fig. 4 et 5).

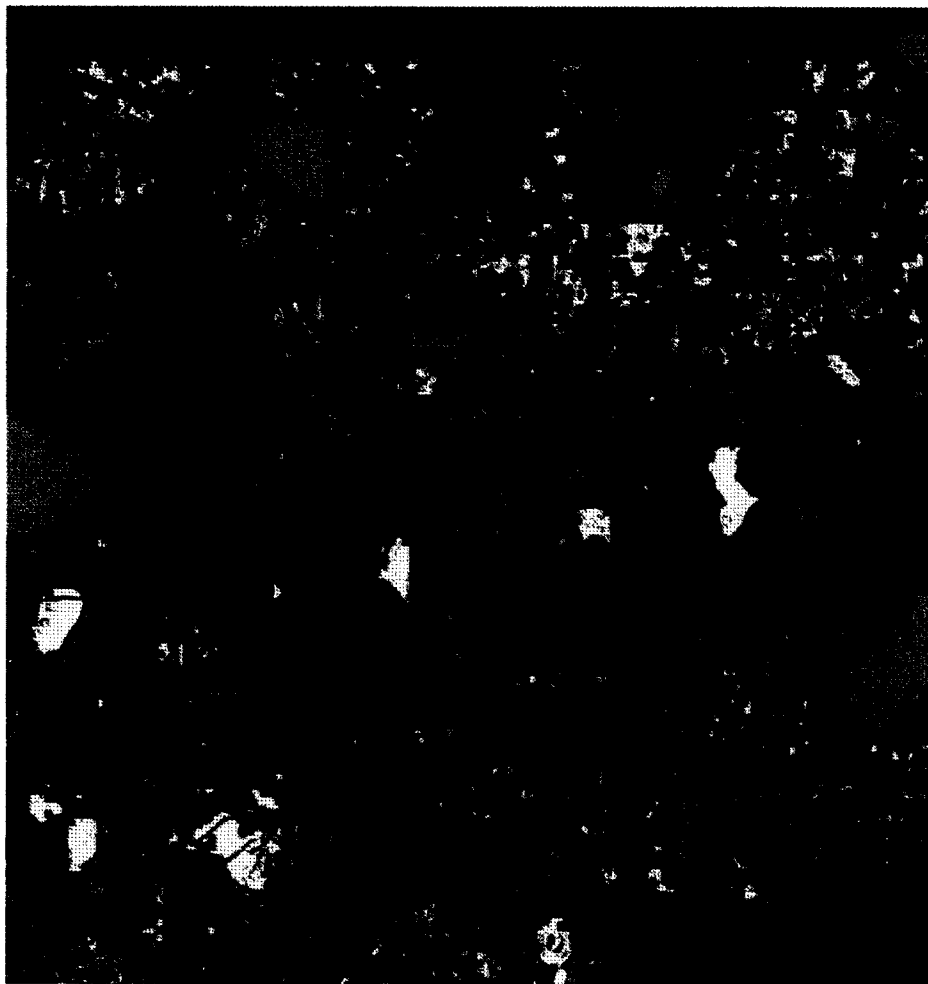


Fig. 4 -
Cartographie X
Aluminium de la partie
centrale de la figure 5.

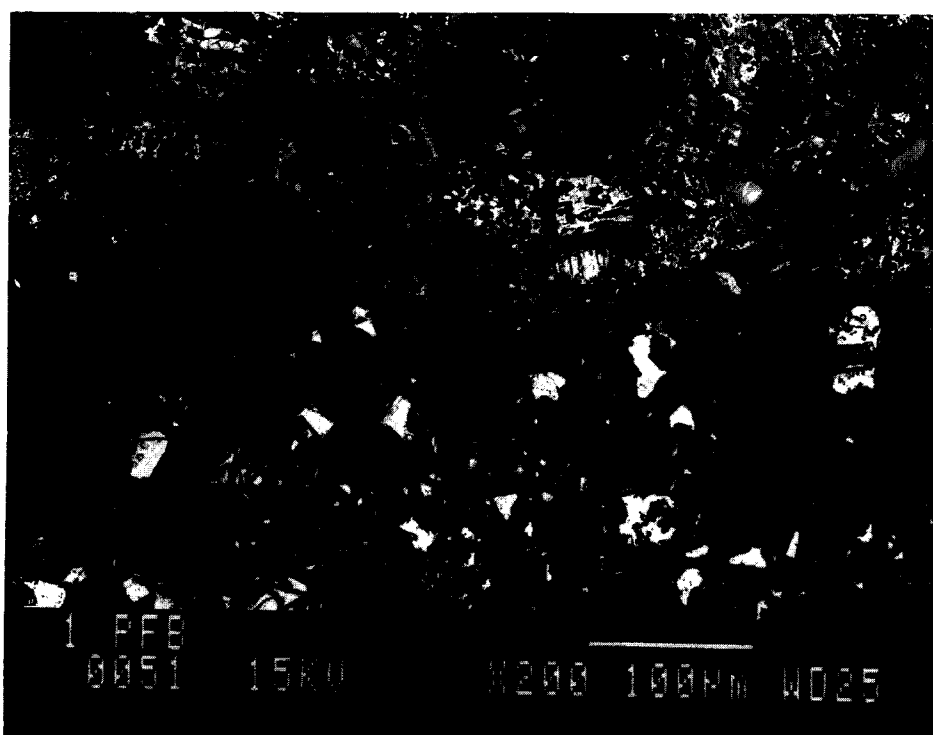


Fig. 5 -
Interface
Portland-Alumineux
vue au microscope
électronique à balayage
sur face polie.

Alumineux

← Interface

Portland

En effet, par nature la pâte de ciment Portland est pauvre en alumine. Or les cartographies montrent que la concentration en élément Al est pratiquement la même du côté Portland de l'interface, sur une centaine de micromètres, que du côté Fondu.

Ces résultats confirment une liaison très forte établie par le contact direct entre les deux bétons.

Les analyses LCPC

Investigations

Au service de chimie du LCPC, chaque type de béton a subi une analyse minéralogique séparée et l'interface a fait l'objet d'une étude texturale particulière au MEB sur fracture fraîche, pour observer l'interaction entre les deux matériaux. En outre, les mesures de densité apparente et de porosité ont été effectuées par pesées hydrostatiques.

Les analyses minéralogiques habituelles pour ce laboratoire comprennent les investigations suivantes :

- analyse chimique du filtrat d'une attaque ménagée du matériau par l'acide nitrique dilué (1 : 50, soit 0,25 N). Cette attaque a pour but de ne faire passer en solution que le liant du béton et la partie calcaire des granulats ;
- détermination des espèces minérales présentes, par diffractométrie des rayons X, en vue de détecter d'éventuelles espèces délétères dans le matériau ;
- analyses thermogravimétrique et thermique différentielle simultanées pour quantifier les différents départs d'eau (basse température, hydroxylique) et d'anhydride carbonique (CO_2 de carbonatation, de la dolomite et de la calcite) ;
- observation en microscopie électronique à balayage avec analyse du spectre des rayons X émis.

Les résultats issus de ces investigations sont traités par itération à l'aide du programme « Minéraux », pour en extraire la composition minéralogique quantitative du béton [6].

Le calcul minéralogique transforme les données de l'analyse chimique centésimale en composition minéralogique quantitative. Il permet notamment de déterminer la teneur en ciment d'un béton par deux méthodes indépendantes, d'une part, à partir d'une formule itérative dérivée de celle du CETIC [7] et d'autre part, par un oxyde directeur, en général la silice soluble (l'alumine dans le cas du béton de ciment Fondu). Il permet également, dans la plupart des cas, de déterminer le taux de carbonatation du

béton même en présence de granulats calcaires et de connaître la répartition entre granulats calcaires et granulats siliceux [8].

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.

Résultats

Dans le cas du viaduc de l'avenue du Rhône à Annecy, les calculs minéralogiques des deux bétons de la carotte n° 4 sont « équilibrés » pour des dosages en ciment assez voisins et des rapports E/C bas, soit respectivement :

- 400 kg/m³ avec un E/C 0,45 pour le béton au ciment Portland,
- 430 kg/m³ avec un E/C de 0,42 pour le béton au ciment alumineux.

On retrouve là des valeurs très proches de celles déterminées par le laboratoire Lafarge.

Les calculs minéralogiques indiquent que les granulats sont silico-calcaires dans les deux cas. On peut noter au passage que ceux-ci ne libèrent pas d'alcalins car, dans le béton alumineux, ces derniers n'apparaissent qu'à l'état de traces.

Comme la diffractométrie des rayons X ne détecte les aluminates hydratés que sous forme d'hydrogrénats (C_3AH_6) et ne révèle pas la phase principale du ciment alumineux à l'état anhydre (CA), il est permis d'en tirer deux conclusions :

- la transformation hexagonal-cubique des hydrates de ce ciment est complètement achevée, assurant ainsi la stabilité physico-chimique du matériau [9] ;
- la réserve de ciment alumineux anhydre a été complètement utilisée pour compenser la porosité induite par la transformation $\text{CAH}_{10} \rightarrow \text{C}_3\text{AH}_6$, ce qui explique la compacité actuelle du béton de clavage (densité 2,48 - porosité volumique 6,42 % (fig. 6).

Le béton de ciment Portland n'appelle aucune remarque particulière, hormis une carbonatation de surface à l'interface entre le béton de travée et le béton de clavage (fig. 7 et 8). Celle-ci s'est vraisemblablement développée avant le coulage du béton alumineux et a pu jouer un rôle dans la diffusion.

L'étude texturale effectuée au microscope électronique à balayage sur cette interface n'a pas montré de dégradation particulière, hormis la carbonatation de surface du béton de Portland citée plus haut et, côté béton de clavage, une trace très ponctuelle d'hydrolyse alcaline dans une cavité de la pâte.



Fig. 6

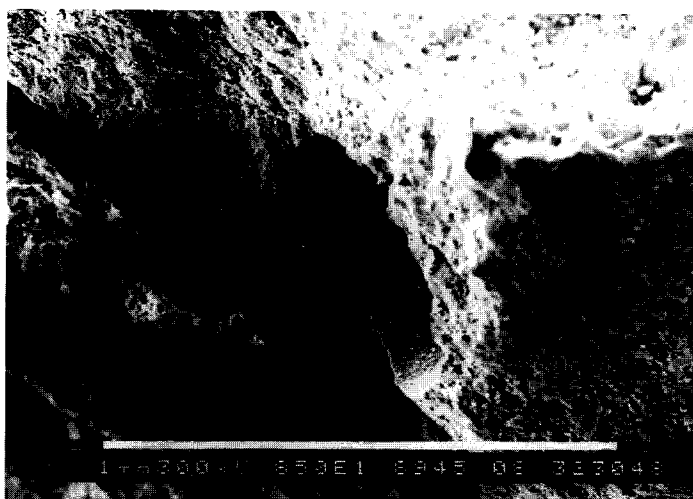
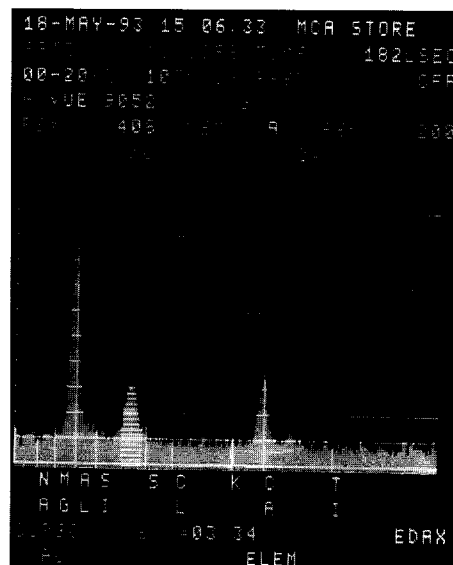


Fig. 7.

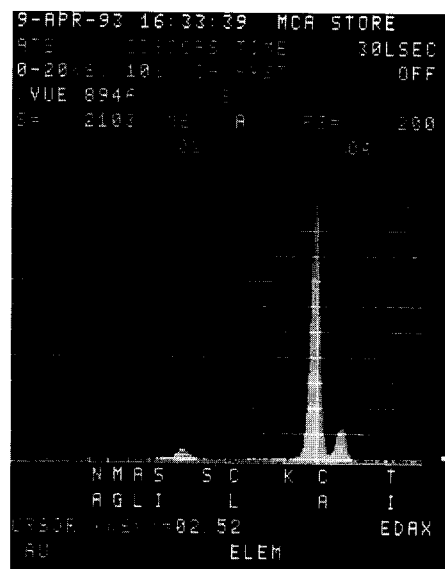
Fig. 6 - (X 2500)
Cristaux d'aluminates de calcium
vus sur fracture fraîche à l'interface
côté béton alumineux et spectre X
correspondant.

Fig. 7 - (X 85)
Aspect du béton Portland recouvert
d'un dépôt blanchâtre de calcite.

Fig. 8 - (X 1200)
Détails de cristaux de calcite et spectre X
correspondant.



Fig. 8



La présence de chlore détectée à côté des alcalins dans le gel observé ainsi que le caractère exceptionnel de cette observation permettent de penser que cette hydrolyse a été induite par une infiltration fortuite et très localisée de sels de déverglaçage.

Il ne faut donc pas « saler » un ouvrage clavé au béton de ciment Fondu pour éviter tout risque d'hydrolyse alcaline des aluminates, avec comme corollaire outre la diminution du pH, une altération des performances mécaniques liée à la formation d'un gel d'hydroxyde d'alumine.

Dans ces conditions, il est nécessaire d'apporter un soin particulier à l'étanchéité du tablier.

Complémentarité des études

Au vu de ce qui précède, on peut remarquer que les investigations du laboratoire Lafarge et celles du LCPC sont complémentaires. Les recoupelements effectués donnent des résultats très voisins, bien qu'obtenus sur des carottes différentes.

Conclusions

Les études minéralogiques de texture entreprises à l'interface entre un béton de ciment Portland et un béton de ciment alumineux au niveau d'un clavage sur un ouvrage en service depuis 14 ans, permettent de tirer les conclusions suivantes :

- la transformation hexagonal - cubique du ciment Fondu est complète au bout de ce délai ;

- la réserve de ciment alumineux anhydre liée au E/C bas, a joué son rôle en permettant de conserver la compacité du béton pendant la transformation ;

- la diffusion des ions Al^{+++} du ciment alumineux vers le ciment Portland est limitée à une centaine de micromètres, ce qui n'a pas affecté les performances mécaniques des deux matériaux ;

- comme le montrent les analyses, le béton de ciment Portland n'a pas été altéré par la présence du béton de clavage.

Enfin, les conclusions pratiques que l'on peut tirer de ces investigations concernent tout d'abord l'importance du respect des précautions d'emploi du ciment alumineux, en particulier le E/C et le serrage du béton lors de sa mise en œuvre, sans oublier le dosage en ciment. Ces paramètres avaient des valeurs correctes dans le clavage du viaduc de l'avenue du Rhône à Annecy.

À la condition que les règles d'emploi du ciment Fondu soient bien respectées, ces études confirment deux certitudes :

- le béton au ciment alumineux Fondu est un matériau fiable,

- les liaisons avec du béton de ciment Fondu dans des structures en bétons de ciment Portland ne posent aucun problème d'interaction ni de pérennité.

Rappel des règles relatives à l'emploi du ciment alumineux

D'une manière générale, toutes les techniques habituellement utilisées pour la mise en œuvre des bétons de ciments Portland sont applicables aux bétons de ciment alumineux.

Les conditions de préparation des bétons de ciment alumineux présentent des contraintes supplémentaires et il convient de respecter celles-ci impérativement :

- les granulats doivent être propres, de bonne qualité, et non susceptibles de libérer des alcalins ;
- le dosage en ciment alumineux doit être au minimum de 400 kg/m^3 de béton ;
- l'eau de gâchage doit être propre et provenir de préférence du réseau d'eau potable ;
- le rapport E/C (eau totale / ciment) doit être inférieur ou au plus égal à 0,4 pour assurer une réserve de ciment anhydre.

Ces conditions sont généralement suffisantes, compte tenu de la rhéologie du béton de ciment alumineux, pour obtenir une bonne mise en place par pénétration.

D'autre part, tous les matériels devant être en contact avec le béton ou ses constituants doivent être propres. Il faut en particulier éviter, dans les malaxeurs, le contact avec des traces de ciment ou de béton de Portland, qui risqueraient de provoquer une prise accélérée du béton de ciment alumineux.

Enfin, rappelons que les directives relatives aux caractéristiques et aux conditions d'emploi du ciment alumineux Fondu en éléments de structure font l'objet de la norme **NF P 15-315** et du fascicule de documentation P 15-316.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- | | |
|---|--|
| <p>[1] BARNES P. (1983), <i>Structure and Performance of cement</i>. Chap. 9 Industrial Aluminous Cements Applied Science ed., London.</p> <p>[2] GEORGE C.-H. (1990), <i>Manufacture and performance of aluminous Cement. A new perspective</i>, in Calcium Aluminates Cements, R. J. Mangabhi ed., London.</p> <p>[3] BARON J., OLLIVIER J.-P., <i>La durabilité des bétons</i>, Presses de l'ENPC, Paris.</p> <p>[4] Norme NF P 15 - 315 (1991), AFNOR ed.</p> <p>[5] Fascicule de documentation P 15 - 316 (1991) avr., AFNOR ed.</p> | <p>[6] DELOYE F.-X. (1977), Utilisation du calcul automatique en analyse minéralogique quantitative, <i>Bull. liaison Labo. P. et Ch.</i>, 89, mai-juin, pp. 33-38.</p> <p>[7] LONGUET P., DELOYE F.-X. (1983), <i>Exploitation des données apportées par l'analyse du béton durci</i>, Ann. ITBTP, 417, sept., série Béton 216.</p> <p>[8] AAENPC (1982), <i>Le béton hydraulique. Connaissance du béton hydraulique</i>, ch. 30, Presses ENPC, Paris.</p> <p>[9] LEA F.M., <i>The Chemistry of Cement and Concrete</i>, Chap. 16, High Alumina Cement.</p> |
|---|--|

ABSTRACT

**The long term behaviour of a « Portland-Aluminous » cement
An example of wedging incorporating an aluminous concrete : the avenue du Rhône viaduct in Annecy**

F.-X. DELOYE - B. LORANG - R. MONTGOMERY - I. MODERCIN - A. REYMOND

Operations demanding a rapid hardening of the material, such as certain wedging operations, require a contact between aluminous cement concrete and a conventional concrete incorporating Portland cement, already hardened. In the light of the chemical characteristics of the two types of binder, the question of the long term behaviour of such a bonding may arise.

The case of the Avenue du Rhône viaduct spanning the 25 kV electric railway lines in Annecy provides a response to this question through a joint assessment carried out by the LCPC and the Lafarge Central Laboratory sixteen years after the execution of a wedging operation using aluminous cement concrete.

The authors describe the characteristics of the structure, the requirements which led to the choice of an aluminous concrete for wedging the girders, the conditions under which this wedging was performed, and details of the samples taken and investigations made by the two laboratories. The conclusions show that the « Portland-Aluminous » bonding is stable in the long term, on condition that the aluminous cement concrete is applied strictly in accordance with certain rules which the authors specify.