

Comment se prémunir des réactions sulfatiques dans les bétons ?

Point sur les normes actuelles et quelques recommandations

Loïc DIVET

Laboratoire Central des Ponts et Chaussées

Note

technique

Introduction

Les sulfates représentent un risque majeur d'agression chimique pour le béton. Une enquête de l'OCDE (Organisation de Coopération et de Développement Économique) réalisée en 1989 indique que l'attaque par les sulfates est la deuxième cause de dégradations relevées sur 800 000 ponts de par le monde, après la corrosion des aciers. La source des produits sulfatés peut être d'origine externe ou interne au béton. Dans le premier cas, les sulfates proviennent des liquides et des gaz qui pénètrent dans le béton. Dans le second cas, ils sont apportés par les constituants mêmes du béton et, en particulier, par le ciment. Le risque est alors de voir apparaître une réaction sulfatique interne, due à une élévation de température au-delà de 60-70 °C, pendant la prise du béton et au choix inadéquat des constituants du béton. Ce phénomène est connu sous le terme de formation différée de l'ettringite.

Les normes françaises actuelles fixent pour le béton des prescriptions de composition qui dépendent de l'environnement auquel l'ouvrage sera soumis. Ces prescriptions sont censées garantir la durabilité de l'ouvrage vis-à-vis d'une réaction sulfatique d'origine externe. Mais les textes n'apportent pas de réponses en matière de protection contre la formation différée de l'ettringite. Cela peut s'expliquer par la méconnaissance des mécanismes. Cependant, les cas de structures malades répertoriés en France sont pour l'instant peu nombreux, mais suffisamment importants pour justifier que des précautions soient prises.

L'objectif de ce document est de rappeler tout d'abord l'influence de la qualité du béton et de la teneur en C_3A du ciment vis-à-vis des réactions sulfatiques, ainsi que les normes françaises permettant de se prémunir des réactions sulfatiques d'origine externe. Pour la formation différée de l'ettringite, nous avons établi une liste des textes, normes ou projets de norme européens actuellement disponibles. Enfin, en l'absence de textes français, nous donnons quelques recommandations, sur la base des connaissances actuelles, sur la réaction sulfatique interne. Elles ont pour objectifs de limiter les risques de désordres liés à cette réaction.

Influence de la qualité du béton et de la teneur en C_3A du ciment vis-à-vis des réactions sulfatiques

La conception de bétons durables dans un environnement sulfatique dépend principalement de la qualité du béton et du choix du ciment. Il faut un béton compact et peu perméable. Ces qualités sont obtenues en :

- employant des granulats de qualité conforme aux normes ;
- utilisant un dosage en liant suffisant ;
- gâchant avec le moins d'eau possible (d'où la nécessité le plus souvent d'utiliser un superplastifiant) ;
- utilisant des moyens efficaces de mise en œuvre ;
- soignant la cure avant l'exposition en milieu agressif.

La qualité apportée en respectant ces différents critères sert alors à limiter la « capacité de transfert » du béton, exprimée par un coefficient de perméabilité ou de diffusion.

Un autre paramètre qui conditionne la tenue des bétons en milieu sulfatique est le choix du ciment. En effet, il existe un lien direct entre le gonflement produit par l'attaque sulfatique et la teneur en aluminat tricalcique (C_3A) du ciment. La vitesse de dégradation est proportionnelle au pourcentage de C_3A du ciment (Ouyang *et al.*, 1988).

Les composés du ciment qui réagissent lors d'une attaque sulfatique sont principalement la portlandite, libérée surtout par l'hydratation du C_3S , et les aluminates provenant de l'hydratation du C_3A . Un ciment pour usage en milieu sulfatique doit donc avoir peu d'aluminates (limites en C_3A) et peu de portlandite $Ca(OH)_2$ une fois hydraté. Dans ces conditions, les ciments pour travaux en eaux à haute teneur en sulfate répondent à ces critères. De même, les additions minérales de laitiers de haut-fourneau, de cendres volantes et de fumées de silice améliorent la résistance des bétons aux sulfates, d'une part par dilution des aluminates et, d'autre part, par la réduction de la teneur en portlandite.

Normalisation française actuelle vis-à-vis des réactions sulfatiques externes

Les spécifications des bétons destinés à l'exécution des ouvrages et constructions sont réglementées en France par des normes Afnor, complétées par le fascicule 65 du CCTG (cahier des clauses techniques générales), pour les ouvrages d'art réalisés dans le cadre de marchés publics. Les normes concernées pour la prévention des désordres dus à l'activité sulfatique sont les suivantes :

➤ **NF P 18-011, juin 1992**

« Bétons – classification des environnements agressifs »

Cette norme fournit les caractéristiques essentielles pour la formulation de bétons durables. Elles portent notamment sur le type de ciment, son dosage minimal et le rapport E/C maximal.

Elle indique également le niveau de protection nécessaire en fonction de la teneur en SO_4^{2-} de la solution ou du sol au contact du béton. Par contre, elle ne donne pas de classe d'agressivité en fonction de la teneur en sulfure (S^{2-}) ou en soufre (S). Cela concerne principalement les effluents riches en sulfures contenus dans les ouvrages d'assainissement ainsi que les sols argileux ou schisteux susceptibles de contenir des pyrites (FeS_2) qui peuvent s'oxyder en sulfate. À ce sujet, plusieurs cas de dégradation du béton dus aux pyrites contenues dans le matériau adjacent ont été récemment mis en évidence en Grande-Bretagne (Thaumasite Expert Group, 2000).

➤ **NF EN 206-1, février 2002**

« Béton – partie 1 : spécification, performances, production et conformité »

Cette norme, qui sera applicable en France en janvier 2004, définit également des classes d'exposition du béton en fonction de la teneur en SO_4^{2-} dans le sol ou dans les eaux. Il n'existe plus que trois classes d'environnement (référencées XA1 à XA3) au lieu de quatre (référencées A1 à A4) dans la norme NF P 18-011. En effet, l'environnement très fortement agressif, qui conseille notamment d'utiliser une protection externe ou interne du béton, n'existe plus. Quelques différences apparaissent également dans les valeurs limites en SO_4^{2-} . Cette norme fournit également des caractéristiques essentielles de conception de bétons durables : rapport eau/ciment maximal, classe de résistance initiale, teneur minimale en ciment et ciment résistant aux sulfates.

➤ **NF P 15-317, septembre 1995**

« Liants hydrauliques – ciments pour travaux à la mer »

Les ciments conformes à ce document doivent être identifiés par leur désignation selon la norme NF EN 197-1, complétée par les lettres PM.

➤ **XP P 15-319, septembre 1995**

« Liants hydrauliques – ciments pour travaux en eaux à haute teneur en sulfate »

Les ciments conformes à ce document doivent être identifiés par leur désignation selon la norme NF EN 197-1, complétée par les lettres ES.

Les ciments courants à caractéristiques complémentaires PM ou ES portent le marquage CE comme tous les ciments courants, mais ceux-ci ne couvrent pas les caractéristiques complémentaires qui font l'objet des normes françaises NF P 15-317 et XP P 15-319. La conformité à cette norme est attestée par la marque NF.

Cette norme précise, entre autres, les limites de composition ainsi que les spécifications physiques et chimiques des ciments. Pour les ciments CEM I, les spécifications chimiques concernent principalement les teneurs en C_3A et SO_3 : limitation de la teneur en C_3A à 10 % pour les ciments PM et 5 % pour les ciments ES. Une deuxième limite est également fixée pour ces deux types de ciment : $C_3A + 0,27C_3S < 23,5$ % pour les ciments PM et $C_4AF + 2C_3A < 20$ % pour les ciments ES. Les valeurs limites recommandées pour les teneurs en SO_3 sont reportées dans le tableau I.

Pour les ciments CEM II, les teneurs en C_3A et SO_3 ainsi que les taux d'ajouts de constituants secondaires sont aussi limités. Les ciments CEM III sont classés ES si la teneur en laitier de haut-fourneau est supérieure à 60 %. Les ciments CEM V sont classés ES si la teneur en CaO est inférieure à 50 %.

TABLEAU I
Valeurs limites recommandées en SO_3 pour les ciments CEM I
d'après NF P 15-317 et XP P 15-319

Norme NF P 15-317	Norme XP P 15-319
$SO_3 < 3$ % si $C_3A < 8$ %	$SO_3 < 3,5$ % si $C_3A < 3$ %
$SO_3 < 2,5$ % si $8 \% < C_3A < 10$ %	$SO_3 < 2,5$ % si $3 \% < C_3A < 5$ %

Nouvelles normes et règles professionnelles vis-à-vis de la formation différée de l'ettringite

La réaction sulfatique interne peut aussi provenir d'une remobilisation des sulfates initialement contenus dans la matrice cimentaire, consécutivement à un échauffement excessif du béton au jeune âge ; on parle dans ce cas de formation différée de l'ettringite. Ce phénomène est rencontré pour des bétons de composition sensible (teneurs élevées en SO_3 , C_3A et Na_2O équivalent, granulats siliceux ou silicatés, état de microfissuration initiale), soumis à un environnement propice à long terme (humidité suffisamment élevée) et ayant atteint des températures relativement élevées ($> 60-70$ °C), suite à un traitement thermique ou pour une autre raison (pièces massives en béton, bétonnage en période estivale, etc.).

À l'origine, des dégradations ont été observées aux États-Unis, en Finlande et en Allemagne dans des cas spécifiques sur des éléments en béton ayant été durci par traitement thermique. Ces dégradations sont caractérisées par de nombreuses fissures en surface, qui apparaissent après plusieurs années d'exposition à des conditions sévères.

En France, la découverte de cette nouvelle pathologie et de ses manifestations délétères est récente, avec les premiers cas identifiés vers les années 1990. Ce phénomène a été principalement observé dans des pièces massives de ponts en béton coulées en place (Divet, 2001). Les cas de structures malades répertoriées sont pour l'instant peu nombreux (environ une douzaine), mais suffisamment importants pour justifier que des précautions soient prises. De plus, la découverte dans les prochaines années de nouveaux cas d'ouvrages atteints de réaction sulfatique interne reste possible, notamment en raison du délai nécessaire pour que le développement de cette pathologie se manifeste par des symptômes visibles.

Cas des bétons traités thermiquement

Actuellement, il n'existe pas de normes ou de spécifications françaises concernant les prescriptions relatives aux cycles thermiques. Par contre, le fascicule 65-A du Cahier des Clauses Techniques Générales applicables aux marchés publics de travaux donne quelques recommandations. La vitesse

de montée en température ne doit pas dépasser 20 °C/heure et la température maximale atteinte par le béton est limitée à 80 °C. Il apparaît alors que ces deux critères ne sont pas adaptés pour des formules de béton sensibles (teneurs élevées en alcalins, SO₃ et C₃A) à la formation différée de l'ettringite. En effet, une température d'étuvage à 80°C associée à une durée suffisamment longue (la durée exacte de ce facteur n'est pas aujourd'hui parfaitement connue) peut conduire à des phénomènes de gonflement du matériau s'il y a un risque d'exposition à un environnement humide.

Au niveau européen, les valeurs admissibles des différents paramètres des traitements thermiques, issues des normes, des recommandations ou des règles professionnelles, sont consignées dans le tableau II. Elles visent à éviter les microfissurations d'origine thermique, mais aussi celles liées à la formation différée de l'ettringite. Certaines de ces règles sont très restrictives par mesure de sécurité et par méconnaissance de l'influence de chaque facteur sur la réaction. La notion d'interaction entre les différents facteurs est rarement prise en compte. De plus, ces règles s'appliquent indifféremment quel que soit le type de ciment ou de béton. Toutefois, la norme NF EN 13369 « Règles communes pour les produits préfabriqués en béton », qui sera applicable en France en juillet 2004, prend en compte cette notion de réaction multiparamétrique de la formation différée de l'ettringite. En effet, elle indique des limites à ne pas dépasser pour les teneurs en SO₃ du ciment et en alcalins équivalents du béton. Par ailleurs, les températures maximales critiques dépendent de l'environnement humide ou sec de la pièce en béton.

TABLEAU II
Normes et recommandations autres que françaises
pour la réalisation des traitements thermiques

Température et durée de la période d'attente (°C)	Vitesse de montée en température (°C/h)	Température maximale critique (°C)	Références
T° ambiante, 4 heures	< 20	70	Ministère anglais des transports, Lawrence et al. (1990)
30, 3 heures	< 20	60, SO ₃ ciment < 2 % 55, SO ₃ ciment < 3 % 50, SO ₃ ciment < 4 %	NF EN 13230-1 (1998) Application ferroviaire-voie-traverses et supports en béton
<u>Environnement sec :</u> 30, 3 heures	< 20	<u>Environnement sec :</u> 80	Comité allemand pour le béton armé (1989)
<u>Environnement humide :</u> 40, 4 heures		<u>Environnement humide :</u> 60	
Période de préchauffage adaptée		<u>Environnement sec :</u> 85 ⁽¹⁾ <u>Environnement humide :</u> 65 ⁽²⁾	NF EN 13369 (2001) Règles communes pour les produits préfabriqués en béton

(1) Si $T > 70$ °C, il faut démontrer, par des essais réalisés à 90 jours, qu'il n'a pas de perte de résistance.

(2) Si $T > 65$ °C, il faut soit démontrer par une expérience la durabilité du béton, soit utiliser un ciment avec une teneur en SO₃ < 3,5 % et une teneur en Na₂O équivalent du béton < 3,5 kg/m³.

Cas des bétons de grande masse

Jusqu'à un passé récent, seuls les barrages constituaient des ouvrages en béton suffisamment massifs pour que l'exothermie du béton soit susceptible d'y poser de réels problèmes. Mais, depuis quelques années, ces problèmes apparaissent aussi pour des pièces localement massives et complexes que l'on réalise de plus en plus souvent, avec des ciments plus exothermiques ou plus « nerveux », à des rythmes de construction souvent soutenus. Il est parfois difficile de concilier la durabilité en place et la rapidité d'exécution.

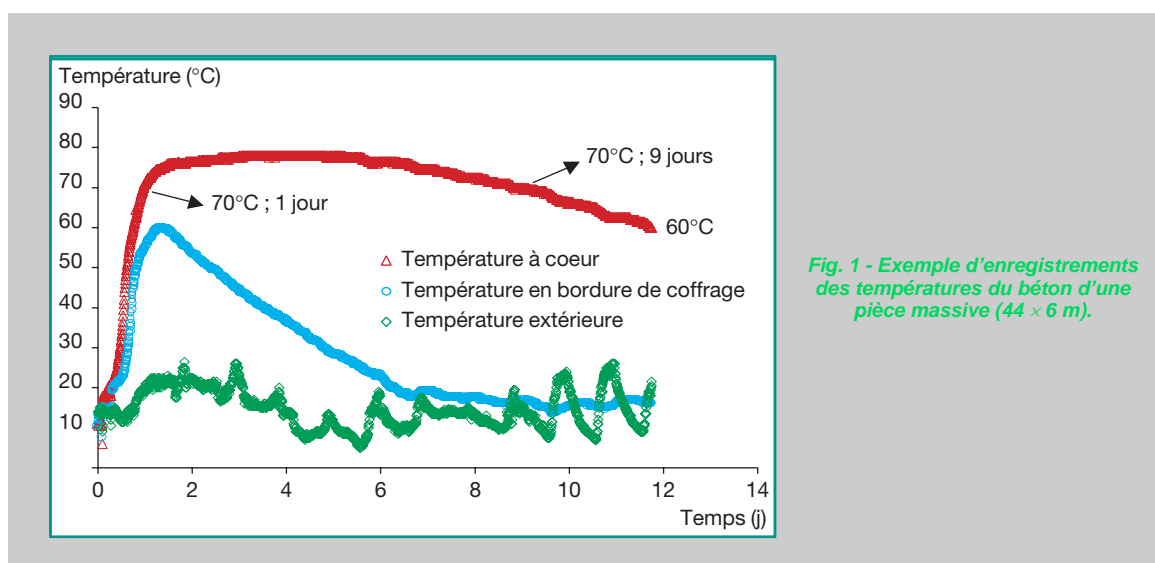
Les ciments dégagent plus ou moins de chaleur lors de leur hydratation en présence d'eau et ce dès le début de la prise. Cette chaleur se dissipe lentement, surtout dans le cas de bétonnage en

grande masse du fait de la faible conductivité thermique du béton. Les échauffements qui en résultent peuvent être importants pour les ouvrages massifs alors qu'ils sont négligeables pour les pièces minces à fort rapport surface/volume. La prise est le moment où les réactions chimiques sont les plus rapides : la température du béton passe par un maximum puis diminue progressivement (fig. 1).

L'élévation de la température au sein d'une masse de béton varie en fonction d'un grand nombre de paramètres : dosage des constituants, nature des granulats, teneur en eau, mise en œuvre, température initiale et déperditions.

Des différences importantes existent entre les bétons traités thermiquement et les bétons de grande masse, pour lesquels le cycle thermique est plus sévère compte tenu de la durée prolongée de maintien à une température élevée (Divet 1998, 2001).

La connaissance du phénomène de formation différée de l'ettringite a eu de nouveaux développements. Au niveau européen, la prénorme ENV 13670-1 « Exécution des ouvrages en béton » donne quelques recommandations concernant l'échauffement du béton pendant sa prise. En effet, elle indique que le pic de température du béton dans un élément ne doit pas dépasser 65 °C, à moins que des données ne prouvent qu'avec les matériaux utilisés, des températures supérieures n'ont aucun effet néfaste significatif sur la performance en service du béton. Par contre, il n'existe actuellement aucun texte en France qui limite l'échauffement du béton coulé en place. De récentes manifestations de ce phénomène ont alors alarmé l'Administration française. Nos connaissances dans ce domaine se sont enrichies de nouvelles données grâce à des travaux de recherche ou à des observations réalisées *in situ* lors de missions d'expertise. Il paraît donc utile de donner quelques indications pour se prémunir contre ce phénomène.



Recommandations pour la prévention des désordres dus à la formation différée de l'ettringite dans les pièces massives en béton coulées en place

Les recommandations présentées ci-après viennent en complément des règles de l'art habituelles qui assurent à la fois la qualité du béton et sa durabilité. Elles supposent l'application des règles de conception et de réalisation des ouvrages et, en particulier, les dispositions constructives relatives à l'étanchéité et à l'évacuation des eaux.

Pour des parties d'ouvrage soumises à un environnement sec

Il semble que la réaction sulfatique interne ne se développe pas même avec un fort échauffement. En effet, l'eau est la source indispensable pour provoquer des désordres au sein de la structure. Toutefois, il est préférable de ne pas dépasser 85 °C pour éviter des modifications importantes des propriétés du béton. Les conséquences d'un échauffement important du béton pendant sa prise sont aujourd'hui relativement bien connues. Il s'agit principalement de la baisse des résistances mécaniques à long terme et d'une éventuelle fissuration du matériau suite aux contraintes thermiques.

Pour des parties d'ouvrages soumises à un environnement humide ou à une alternance d'humidité et de séchage

Une première précaution pourrait consister à limiter la température atteinte dans le béton. Plusieurs solutions peuvent être envisagées :

- utilisation de ciment à faible chaleur d'hydratation ;
- diminution du dosage en ciment grâce à l'utilisation d'additions minérales : laitier de haut fourneau, cendres volantes, fumées de silice ;
- choix d'un bétonnage en dehors des périodes chaudes ;
- refroidissement du béton lors de la fabrication (introduction de glace, arrosage des granulats, etc.) ;
- utilisation d'un système de refroidissement du béton en place pendant sa prise (circulation d'eau froide dans des tubes, etc.).

La difficulté réside dans l'établissement d'un seuil critique qui se trouve vraisemblablement dans la fourchette de température 60-70 °C. Cette température critique est une condition indispensable dans les mécanismes de la formation différée de l'ettringite. En effet, elle modifie les réactions d'hydratation liées à la consommation des sulfates apportés par le gypsage du ciment. Dans ces conditions, des sulfates se trouvent non combinés chimiquement aux hydrates et seront remobilisés pour former plus tardivement de l'ettringite qui présente, sous certaines conditions thermodynamiques, des propriétés expansives. Toutefois, la valeur acceptable de ce paramètre dépend également d'autres paramètres tels que la basicité du milieu, qui est principalement liée à la teneur en alcalins du ciment. En effet, les alcalins interviennent également dans les mécanismes en favorisant, comme pour la température, la formation de sulfates « libres » dans la matrice cimentaire. Par conséquent, il est difficile d'établir un seuil critique pour la température. Par précaution, il pourra être fixé à une température de 65 °C.

Dans le cas où la température au sein du matériau est susceptible d'atteindre des valeurs comprises entre 65 et 85 °C, il serait nécessaire d'utiliser des ciments contenant de faibles teneurs en alcalins, SO_3 et C_3A . Pour ces deux derniers facteurs, l'emploi de liants pour travaux en eaux à haute teneur en sulfates devrait éviter le phénomène (ciment conforme à la norme XP P 15-319). Néanmoins, ce choix de ciment doit être associé à une teneur en alcalins équivalents du béton inférieure à 3 kg/m³. L'établissement de cette valeur critique repose sur les connaissances acquises lors d'études d'ouvrages malades en service (Divet, 2001) et des données issues de recherches (Lewis et al., 1995 ; Grat-tan-Bellew et al., 1998 ; Heinz et al., 1999 ; Hime et Marusin, 1999). Les additions minérales de laitier de haut-fourneau, de cendres volantes, de pouzzolanes naturelles et de fumées de silice devraient aussi améliorer la résistance des bétons à ce type de pathologie. Toutefois, on ne connaît pas parfaitement aujourd'hui les quantités suffisantes d'addition ou d'ajouts minéraux pour la prévention des désordres par la réaction sulfatique interne.

Enfin, le critère de bon comportement du matériau vis-à-vis de la formation différée de l'ettringite peut également être fondé sur une caractérisation expérimentale directe de la formule de béton (approche performancielle à partir d'un essai accéléré). Le principe de cette méthode expérimentale consiste à mesurer, par un essai accéléré, l'allongement d'éprouvettes de béton dont la formule et l'échauffement du béton sont représentatifs de ce qui sera effectivement utilisé et rencontré pour réaliser l'ouvrage. Il suffira alors de vérifier que l'expansion des éprouvettes reste inférieure à un seuil fixé. Le LCPC met d'ailleurs au point, en partenariat avec l'ATILH (Association Technique de l'Industrie des Liants Hydrauliques) et le CERIB (Centre d'études et de Recherches de l'Industrie du Béton), ce type d'essai performanciel (Pavoine et al., 2003). Le seuil de gonflement des éprouvettes de béton n'a pas été fixé, mais le suivi sur plusieurs mois des mesures de variations dimen-

sionnelles permettent de donner des informations pertinentes sur le bon ou le mauvais comportement d'un béton vis-à-vis d'un traitement thermique donné.

Cette liste de mesures préventives envisageables est établie en l'état actuel des connaissances. Elle doit être complétée et validée par des études complémentaires afin de déterminer, entre autres, les valeurs admissibles des différents facteurs. Néanmoins, une partie de cette liste de mesures préventives se trouve déjà dans le logiciel d'aide à l'établissement des pièces techniques des marchés publics (logiciel capt-dce). En particulier, la température maximale dans la pièce bétonnée a été fixée par précaution à 60 °C.

Conclusions

Le béton est un matériau durable et résistant aux agressions chimiques lorsque certaines règles simples sont prises. Pour cela, il suffit de réaliser un béton suffisamment dosé en ciment et très compact afin d'avoir une porosité et une perméabilité minimales. Ces qualités sont obtenues en réduisant le rapport E/C tout en respectant les impératifs de la mise en œuvre du béton.

Par ailleurs, il est aussi indispensable de s'appuyer sur la réglementation française qui fournit les renseignements nécessaires sur la composition chimique et minéralogique des ciments utilisables en milieu sulfatique. En particulier, la composante aluminat de la pâte de ciment est extrêmement réactive vis-à-vis de tout apport en sulfate.

Dans l'état actuel des connaissances, pour se prémunir d'une attaque sulfatique interne dans des pièces exposées à l'humidité, une première précaution consiste à limiter l'échauffement du béton à une température inférieure à 65 °C. Dans le cas contraire, d'autres possibilités peuvent être envisagées : le choix d'un ciment adapté (teneurs en sulfates, en alcalins et en aluminates faibles, présence d'additions minérales) ou la vérification expérimentale du bon comportement d'un béton à partir d'un essai de performance.

Les dégradations qui se manifestent résultent le plus souvent du non respect de ces règles. Toutefois, dans quelques cas, l'activité sulfatique peut provenir de l'insuffisance des connaissances actuelles. L'exemple de la formation différée de l'ettringite suite à une élévation de température pendant la prise du béton illustre la complexité des réactions chimiques. Les connaissances dans ce domaine se sont enrichies de nouvelles données grâce à des travaux de recherche ou à des observations *in situ* de sorte que certaines dispositions peuvent être prises pour se prémunir contre ce phénomène.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

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*, Etudes et Recherches des laboratoires des Ponts et Chaussées, série Ouvrages d'Art, OA 40, Paris, décembre **2001**, 227 p.

prEN 13670-1 : Exécution des ouvrages en béton – Partie 1 : Tronc commun, **1999**.

GERMAN COMMITTEE FOR REINFORCED CONCRETE, *Recommendation on the heat treatment of concrete*, Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, DIN Deutsches Institut für Normung e.b. Bundesallee 216/218, D-1000 Berlin, sept., **1989**, p. 13.

GRATTAN-BELLEW P.E., BEAUDOIN J.J., VALLEE V.G., Delayed ettringite formation : effect of clinker particle size and composition on expansion of mortar bars, *Materials Science of Concrete. Proceedings of the Sidney Diamond Symposium*, august **1998**, pp. 295-307.

HEINZ D., KALDE M., Delayed Ettringite Formation : many questions and some answers, *Ettringite – The sometimes host of destruction*, **1999**, pp. 1-14.

HIME W.G., MARUSIN S., Present State of Investigation on damaging Late Ettringite Formation in mortars and concretes, *Ettringite – The sometimes host of destruction*, **1999**, pp. 199-206.

LAWRENCE C.D., DALZIEL J.A., HOBBS D.W., *Sulphate attack arising from delayed ettringite formation*, Interim technical Note, **12**, British Cement Association, Wexham Springs, Slough, UK, may, **1990**.

LEWIS M.C., SCRIVENER K.L., KELHAM S., *Heat curing and delayed ettringite formation*, Mat. Res. Soc. Symp. Proc., vol. **370**, **1995**, pp. 67-76.

Logiciel capt-dce (Conception Automatisée des Pièces Techniques des Dossiers de Consultation des Entreprises), **2000**, Éditeur SETRA, mise à jour annuelle.

NF P18-011 : *Bétons – Classification des environnements agressifs*, Afnor, **1992**.

NF EN 13 230-1 : *Application ferroviaire-voie-traverses et supports en béton – Chap. 6.2 – Procédés de fabrication*, Afnor, **1998**.

NF EN 206-1 : *Béton – Partie 1 : spécification, performances, production et conformité*, Afnor, février **2002**.

NF P15-317 : *Liants hydrauliques – Ciments pour travaux à la mer*, Afnor, **1995**.

XP P15-319 : *Liants hydrauliques – Définitions, Ciments pour travaux en eaux à haute teneur en sulfate*, Afnor, **1995**.

NF EN 13369 : *Règles communes pour les produits préfabriqués en béton*, Afnor, octobre **2001**.

OUHANG C., NANNI A., CHANG W.F. Internal and external sources of sulfate ions in Portland cement mortar : two types of chemical attack, *Cement and Concrete Research*, vol. 18, 5, **1988**, pp. 699-709.

PAVOINE A., DIVET L., FENOUILLET S., RANDAZZO V., DAVY J.P., Mise au point d'un essai de performance sur éprouvette de béton vis-à-vis de la formation différée de l'ettringite, *Matériaux et Structures*, à paraître, **2003**.

THAUMASITE Eexpert Group, One-year review, *Concrete*, vol. 34, **6**, june **2000**, pp. 51-53.

VERBECK G.J, *Field and laboratory studies of the sulphate resistance of concrete*, *Performance of concrete*, A symposium in honour of T. Thorvaldson, Toronto, 1967, University of Toronto Press, E.G. Swenson, Ed., PCA Research Department Bulletin, **227**, **1968**, pp. 113-124.