

Réaction sulfatique interne dans les structures en béton

Mécanisme, pathologie et prévention

par **Bruno GODART**

Directeur technique Ouvrages d'Art au Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC)

et **Loïc DIVET**

Chef de la division Physico-chimie des Matériaux au Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC)

Sources bibliographiques

Références bibliographiques

- [1] HORNAIN (H.) et ROUGEAU (P.). – *Dégradations du béton liées à l'action des sulfates et aux phénomènes d'alcali-réaction*. in Grands associés à la Durabilité des Bétons sous la direction de G. Arliguie et H. Hornain, Presses de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, pp. 205-262 (2007).
- [2] DELOYE (F.X.). – *Action conjuguée du soufre et des alcalins dans les réactions liants-granulats au sein du béton*. Bulletin de liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées, 161, pp. 41-49 (mai-juin 1989).
- [3] TAYLOR (H.F.W.), FAMY (C.) et SCRIVENER (K.). – *Review : Delayed Ettringite Formation*. Cement and Concrete Research, vol. 31, n° 5, pp. 683-693 (2001).
- [4] DIVET (L.). – *Les réactions sulfatiques internes au béton : contribution à l'étude de la formation différée de l'ettringite*. Etudes et Recherches des Laboratoires des Ponts et Chaussées, Ouvrages d'art, OA 40, 227 p. (2001).
- [5] GLASSER (F.P.). – *The stability of ettringite in International RILEM TC. 186-ISA Workshop on Internal Sulfate Attack and Delayed Ettringite Formation*, Villars, Suisse, pp. 43-64 (2002).
- [6] GHORAB (H.Y.) et KISHAR (E.A.). – *Studies on the stability of the calcium sulfoaluminate hydrates. Part 1 : effect of temperature on the stability of ettringite in pure water*. Cement and Concrete Research, vol. 15, n° 1, pp. 93-99 (1985).
- [7] GLASSER (F.P.), DAMIDOT (D.) et ATKINS (M.). – *Phase development in cement in relation to the secondary ettringite formation problem*. Advances in Cement Research, vol. 7, n° 6, pp. 57-68 (1995).
- [8] DAMIDOT (D.) et GLASSER (F.P.). – *Thermodynamic investigations of the $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-Ca-SO}_4\text{-H}_2\text{O}$ system at 50 °C and 85 °C*. Cement and Concrete Research, vol. 22, pp. 1179-1191 (1992).
- [9] DAMIDOT (D.) et GLASSER (F.P.). – *Thermodynamic investigations of the $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-Ca-SO}_4\text{-H}_2\text{O}$ system at 25 °C and the influence of Na_2O* . Cement and Concrete Research, vol. 23, pp. 221-238 (1993).
- [10] BROWN (P.W.) et BOTHE (J.V.). – *The stability of ettringite*. Advances in Cement Research, vol. 5, n° 18, pp. 47-63 (1993).
- [11] SCRIVENER (K.) et LEWIS (M.). – *A microstructural and microanalytical study of heat cured mortars and delayed ettringite formation*. 10th International Congress on the Chemistry of Cement, Göteborg, Suède, 4iV061 (1997).
- [12] ODLER (I.). – *Interaction between gypsum and C-S-H phase formed in C_3S hydration*. 7th International Congress on the Chemistry of Cement, Paris, 4, pp. 493-495 (1980).
- [13] FU (Y.), XIE (P.), GU (P.) et BEAUDOIN (J.J.). – *Effect of temperature on sulphate adsorption/desorption by tricalcium silicates hydrates*. cement and Concrete Research, vol. 24, n° 8, pp. 1428-1432 (1994).
- [14] DIVET (L.) et RANDRIAMBOLOLONA (R.). – *Delayed Ettringite Formation : the effect of temperature and basicity on the interaction of sulphate and C-S-H phase*. Cement and Concrete Research, vol. 28, n° 3, pp. 357-368 (1998).
- [15] BARBARULO (R.), PEYCELON (H.) et LECLERQ (S.). – *Chemical equilibria between C-S-H and ettringite at 20 and 80 °C*. Cement and Concrete Research, vol. 37, pp. 1176-1181 (2007).
- [16] BARBARULO (R.), PEYCELON (H.) et PRENE (S.). – *Experimental study and modelling of sulphate sorption on calcium silicate hydrates*. Annales de chimie des sciences des matériaux, vol. 28, S5-S10 (2003).
- [17] MATSCHEI (T.), SKAPA (R.), LOTHENBACH (B.) et GLASSER (F.). – *The distribution of sulfate in hydrated Portland cement paste*. 12th International Congress on the Chemistry of Cement, Montréal, Canada (2007).
- [18] DRON (R.) et BRIVOT (F.). – *A contribution of the study of ettringite caused expansion*. 8th International Congress on the Chemistry of Cement, Rio de Janeiro, Brésil, pp. 115-120 (1986).
- [19] DRON (R.) et BRIVOT (F.). – *Le gonflement ettringitique*. Bulletin de liaison des laboratoires des Ponts et Chaussées, n° 161, pp. 25-32 (1989).
- [20] XIE (P.) et BEAUDOIN (J.J.). – *Mechanism of sulphate expansion. I-Termodynamic principle of crystallization pressure*. Cement and Concrete Research, vol. 22, pp. 631-640 (1992).
- [21] MEHTA (P.K.). – *Mechanism of expansion associated with ettringite formation*. Cement and Concrete Research, vol. 3, pp. 1-6 (1973).
- [22] SCHERER (G.W.). – *Stress from crystallization of salt*. Cement and Concrete Research, vol. 34, pp. 1613-1624 (2004).
- [23] YANG (C.D.), LAWRENCE (C.J.), LYNDALE (C. J.) et SHARP (J.H.). – *Delayed ettringite formation in heat-cured Portland cement mortar*. Cement and Concrete Research, vol. 29, pp. 17-25 (1999).
- [24] LAWRENCE (C.J.). – *Long-term expansion of mortars and concretes*. volume SP 177, chapter Ettringite – The sometimes host of destruction, American Concrete Institute International, Farmington Hills, MI, USA, B. Erlin edition, pp. 105-123 (1999).
- [25] FU (Y.), DING (J.) et BEAUDOIN (J.J.). – *Expansion of Portland cement mortar due to internal sulfate attack*. Cement and Concrete Research, vol. 27, n° 9, pp. 1299-1306 (1997).
- [26] BRUNETAUD (X.), LINDER (R.), DIVET (L.), DURAGRIN (D.) et DAMIDOT (D.). – *Effect of curing conditions and concrete mix design on the expansion generated by delayed ettringite formation*. Materials and Structures, vol. 40, n° 6, pp. 567-578 (2007).
- [27] HEINZ (D.) et LUDWIG (U.). – *Mechanism of secondary ettringite formation in mortars and concretes subjected to heat treatment*. Concrete durability, American Concrete Institute, K & B Malter, vol. ACI SP-100, Detroit, USA, pp. 2059-2071 (1987).

- [28] GRAF (L.) et JOHANSEN (V.). – *Effect of relative humidity on expansion and microstructure of heat-cured mortars*. 12th International Congress on the Chemistry of Cement, Montréal, Canada (2007).
- [29] FAMY (C.), SCRIVENER (K.), ATKINSON (A.) et BROUGH (A.R.). – *Influence of the storage conditions on the dimensional changes of heat-cured mortars*. Cement and Concrete Research, vol. 31, pp. 795-803 (2003).
- [30] ODLER (I.) et CHEN (Y.). – *On the delayed expansion of heat-cured Portland cement pasts and concretes*. Cement and Composites, vol. 18, pp. 181-185 (1996).
- [31] STARK (J.) et BOLLMANN (K.). – *Investigation into delayed ettringite formation in concrete*. 9th International Congress on the Chemistry of Cement, New Delhi, India, vol. 5, pp. 348-354 (1992).
- [32] DAY (R.L.). – *The effect of secondary ettringite formation on the durability of concrete : a literature analysis*. Research and Development Bulletin RD108T, Portland Cement Association, Skokie, Illinois, USA (1992).
- [33] DIAMOND (S.). – *Delayed ettringite formation : a current assessment*. Workshop on Internal Sulfate Attack and Delayed Ettringite Formation, RILEM-TC-ISA, Suisse (2002).
- [34] OLEK (J.), ZHANG (Z.) et DIAMOND (S.). – *Expansion and microstructural changes in room and heat cured mortars with varying sulfates content*. Workshop on Internal Sulfate Attack and Delayed Ettringite Formation, RILEM-TC-ISA, Suisse (2002).
- [35] GRATAN-BELLEW (P.E.), BEAUDOIN (J.J.) et VALLEE (V.G.). – *Delayed ettringite formation : effect of clinker particle size and composition on expansion of mortars bars*. Materials Science of Concrete, Sidney Diamond Symposium, pp. 295-307 (1998).
- [36] LEWIS (M.C.), SCRIVENER (K.) et KELHAM (S.). – *Heat curing and delayed ettringite formation*. Materials Research Society Symposium, vol. 371, pp. 67-79 (1995).
- [37] MILLER (F.M.) et CONWAY (T.). – *Use of ground granulated blast furnace slag for reduction of expansion due to delayed ettringite formation*. Cement Concrete and Aggregates, vol. 25, n° 2, pp. 59-68 (2003).
- [38] RAMLOCHAN (T.), ZACARIAS (P.), THOMAS (M.D.A.) et HOOTON (R.D.). – *The effect of pozzolans and slag on the expansion of mortars cured at elevated temperature – Part I : Expansive behaviour*. cement and Concrete Research, vol. 33, n° 6, pp. 807-814 (2003).
- [39] DIVET (L.), FASSEU (P.) et SANTOS SILVA (A.). – *Optimisation of the choice of cement in order to reduce the expansion of concrete as a result of delayed ettringite formation*. 7th CANMET/ACI International Conference on Durability of Concrete, Montréal, Canada, Supplementary papers, pp. 331-342 (2006).
- [40] KURDOWSKI (W.) et DUSZAK (S.). – *Influence of limestone and fly ash additions to cement that caused expansion of heat-treated mortar due to DEF*. 11th International Congress on the Chemistry of Cement, Durban, South Africa (2003).
- [41] GRATAN-BELLEW (P.E.) et DEAUDOIN (J.J.). – *Effect of aggregate particle size and composition of mortars bars due to delayed ettringite formation*. Cement and Concrete Research, vol. 28, n° 8, pp. 1147-1156 (1998).
- [42] TEPPONEN (P.) et ERIKSSON (B.E.). – *Damages in concrete railway sleepers in Finland*. Nordic Concrete Research, n° 6, pp. 199-209 (1987).
- [43] HEINZ (D.), KUDWIG (U.) et RUDIGER (I.). – *Delayed ettringite formation in heat treated mortars and concretes*. Betonwerk und Fertigteil-technik, vol. 55, n° 11, pp. 56-61 (1989).
- [44] VITOUVA (L.). – *Concrete Sleepers in CSD tracks*. International symposium on precast concrete railway sleepers, Madrid, pp. 253-264 (1991).
- [45] SHAYAN (A.) et QUICK (G.W.). – *Microscopic features of cracked and uncracked concrete railway sleepers*. ACI Materials, vol. 89, n° 4, pp. 348-361 (1992).
- [46] OBERHOLSTER (R.E.), MAREE (H.) et BRAND (J.H.B.). – *Cracked prestressed concrete railway sleepers : alcalisilica reaction or delayed ettringite formation*. 9th International conference on alcalisilica reaction in concrete, London, Concrete society publication, CS 104, vol. 2, pp. 739-749 (1992).
- [47] MIELENZ (R.C.), MARUSIN (S.L.), HIME (W.G.) et JUGOVIC (Z.T.). – *Investigation of prestressed concrete railway tie distress*. Concrete International, vol. 17, n° 12, pp. 62-68 (1995).
- [48] SAHU (S.) et THAULOW (N.). – *Delayed ettringite formation in Swedish concrete railroad ties*. Cement and Concrete Research, vol. 34, n° 9, pp. 1675-1684 (2004).
- [49] HIME (W.G.). – *Delayed ettringite formation – a concern for precast railroad ties*. PCI Journal, vol. 41, n° 4, pp. 26-30 (1996).
- [50] HOBBS (D.W.). – *Cracking of concrete attributed to delayed ettringite formation*. Proceedings of the eleventh annual BCA/concrete society conference on higher education and the concrete industry, UMIST, Manchester, paper 6, pp. 51-60 (2001).
- [51] OZOL (M.A.) et STRAND (W.). – *Delayed ettringite formation at Brewer Stadium Boone North Carolina*. Cement Concrete Aggregates, vol. 22, n° 1, pp. 24-34 (2000).
- [52] COLLEPARDI (M.). – *Damage by delayed ettringite formation*. Concrete International, vol. 21, n° 1, pp. 69-74 (1999).
- [53] LAWRENCE (B.L.), MYERS (J.J.) et CARRAS-QUILLO (R.L.). – *Premature concrete deterioration in Texas department of transportation precast element, Ettringite – The sometimes lost of destruction*. American concrete Institute, vol. SP 177, chapter 10, pp. 141-158 (1999).
- [54] DIVET (L.), GUERRIER (F.) et LE MESTRE (G.). – *Existe-t-il un risque d'attaque sulfatique endogène dans les pièces en béton de grande masse ?*. Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées, 213, pp. 59-72 (1998).
- [55] DIVET (L.), PAVOINE (A.), CLEMENT (J.L.) et LE MESTRE (G.). – *La réaction de gonflement interne des bétons due à la formation différée de l'ettringite : méthodes de diagnostic et de pronostic*. Annales du bâtiment et des travaux publics, n° 4, pp. 14-24 (2003).
- [56] Recommandations pour la prévention des désordres dus à la réaction sulfatique interne, Guide technique du LCPC (2007).
- [57] *Réactivité d'un béton vis-à-vis d'une réaction sulfatique interne*. Techniques et méthodes des laboratoires des Ponts et Chaussées, méthode d'essai des Lpc n° 66 (2007).
- [58] PAVOINE (A.), DIVET (L.) et FENOUILLET (S.). – *A concrete performance test for delayed ettringite formation : Part I Optimisation*. Cement and Concrete Research, vol. 36, pp. 2138-2143 (2006).
- [59] PAVOINE (A.), DIVET (L.) et FENOUILLET (S.). – *A concrete performance test for delayed ettringite formation : Part II Validation*. Cement and Concrete Research, vol. 36, pp. 2144-2156 (2006).
- [60] LCPC – Manuel d'identification des réactions de dégradation interne du béton dans les ouvrages d'art (février 1999).
- [61] Ministère des Transports – Direction des Routes – Instruction Technique pour la Surveillance et l'entretien des ouvrages d'art – 2^{ème} partie – fascicule 03 : Auscultation, Surveillance Renforcée, Haute surveillance, Mesures de sécurité immédiate ou de sauvegarde. LCPC (1998).
- [62] LCPC – Détermination de l'indice de fissuration d'un parement de béton – Méthode d'essai des LPC n° 47 (octobre 1997).
- [63] LCPC – Aide à la gestion des ouvrages atteints de réactions de gonflement interne, Guide Technique (novembre 2003).
- [64] LCPC – Choix et application des produits de réparation et de protection des ouvrages en béton – Guide Technique SETRA – LCPC (août 1996).
- [65] LCPC – Protection des bétons par application de produits à la surface du parement – Guide Technique LCPC – SETRA (décembre 2002).
- [66] BRE – Delayed ettringite formation : in-situ concrete – Information paper 11/01 du Building Research Establishment par Keith Quillin (Juin 2001).
- [67] CCTG 67 – Cahier des Clauses Techniques Générales – Fascicule 67 – Titre I – Etanchéité des ponts routes. Support en béton de ciment – Numéro spécial 85-32 bis.
- [68] Réaction sulfatique interne au béton. Essai d'expansion résiduelle sur carotte de béton extraite de l'ouvrage. Techniques et méthodes des laboratoires des Ponts et Chaussées, méthode d'essai des LPC n° 67 (2009).

Thèses

- [69] BARBARULO (R.). – *Comportement des matériaux cimentaires : action des sulfates et de la température*. Thèse de doctorat en Génie Civil, Ecole Normale Supérieure de Cachan (2002).
- [70] FAMY (C.). – *Expansion of heat-cured mortars*. Thèse de doctorat, Imperial College, London (1999).
- [71] PAVOINE (A.). – *Evaluation du potentiel de réactivité des bétons vis-à-vis de la formation différée de l'ettringite*. Thèse de doctorat de l'Université Pierre et Marie Curie – Paris 6 (2003).
- [72] PETROV (N.). – *Effets combinés de différents facteurs sur l'expansion des bétons causées par la formation différée de l'ettringite*. Thèse de doctorat de l'Université de Sherbrooke, Canada (2003).

[73] LARIVE (C.). – *Apports combinés de l'expérimentation et de la modélisation à la compréhension de l'alcali-réaction et de ses effets mécaniques*. Thèse de doctorat de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées (1997).

À lire également dans nos bases

GODART (B.) et LEROUX (A.). – *Alcali-réaction dans les structures en béton – Mécanisme, pathologie et prévention*. [C 2 252] (2008).

SAINT MARTIN (C.). – *Pathologie et travaux d'entretien dans le bâtiment – Évolution*. [C 7 000] (2008).

Normes et standards

NF EN 197-1	Ciment – Partie 1 : Composition, spécifications et critères de conformité des ciments courants.	EN 13230-1	Applications ferroviaires – Voie – Traverses et supports en béton – Partie 1 : Prescriptions générales.
NF EN 197-1/A1	Amendement A1 à la norme NF EN 197-1.	NF EN 13369	Règles communes pour les produits préfabriqués en béton.
NF EN 206-1	Béton – Partie 1 : spécification, performances, production et conformité.	NF EN 13369/A1	Amendement A1 à la norme NF EN 13369.
NF EN 206-1/A1	Amendement A1 à la norme NF EN 206-1.	NF P 15-319	Liants hydrauliques – Ciments pour travaux en eaux à haute teneur en sulfates.
NF EN 206-1/A2	Amendement A2 à la norme NF EN 206-1.		

Annuaire

Organismes – Fédérations – Associations

- Association française de génie civil – AFGC
<http://www.afgc.asso.fr/>
- Laboratoire central des Ponts et Chaussées

<http://www.lcpc.fr/>

- Service d'études techniques sur les transports, les routes, les autoroutes et leurs aménagements
<http://www.setra.equipement.gouv.fr/>