

Stabilité des pyrites des granulats calcaires dans les bétons de ciment

André LE ROUX
Loïc DIVET

Laboratoire Central des Ponts et Chaussées

Pascal FASSEU

Laboratoire régional des Ponts et Chaussées de Lille

Lofti HASNI

Centre Expérimental du Bâtiment et des Travaux Publics

Anne-Marie MARION

Centre de Recherche de l'industrie cimentière

RÉSUMÉ

Cet article présente une étude du comportement des sulfures de fer qui peuvent être associés aux granulats calcaires mis en œuvre dans les bétons de ciment. L'objectif est de réduire les risques de dégradation des bétons par réactions internes et en particulier par le développement d'une réaction sulfatique. L'analyse de l'influence des sulfures est effectuée en suivant l'évolution de formulations de béton réalisées avec des granulats contenant des teneurs en sulfure échelonnées. Les formulations ont été mises en cure en respectant deux protocoles de vieillissement et en complétant la cure en réacteur par une suralcalinisation du milieu. Des mesures d'expansion et une étude microstructurale en microscopie électronique à balayage ont été réalisées. Leurs résultats montrent que les sulfures présents n'entraînent aucune réaction expansive des bétons et ce, jusqu'à la teneur maximale testée, et ne présentent aucun signe d'oxydation. La seule réaction expansive a été obtenue avec la série d'essais réalisée à partir de solutions enrichies artificiellement en alcalins. Les gonflements sont alors dus à l'apparition d'une alcali-réaction dans un milieu suralcalinisé. Cette dernière réaction montre aussi que la notion de synergie entre la réaction sulfatique et l'alcali-réaction n'existe pas.

DOMAINE : Ouvrages d'art.

ABSTRACT

This article presents a behavioural study of the iron sulphides potentially associated with the limestone aggregates used in cement concretes. The objective consists of reducing the risk of concrete deterioration by internal reactions and, in particular, by the development of a sulphate reaction. An analysis of the influence of sulphides is carried out by tracking the evolution in concrete mix designs realized with aggregates whose sulphide contents are progressively increased. The different mixes are then cured by adhering to two ageing procedures and by completing the curing period in a reactor that adds excess alkali to the medium. A series of expansion measurements along with a microstructure investigation using scanning electron microscopy are also conducted. Results reveal that the sulphides contained do not engender any expansive reaction in the concretes, up to the highest content level tested, nor do they exhibit any sign of oxidation. The only expansive reaction was obtained with the sequence of tests performed on artificially alkali-enhanced solutions. Swelling can thereby be attributed to the appearance of an alkali reaction within an overly-alkaline medium. This reaction also demonstrates that the notion of synergy between the sulphate reaction and the alkali reaction is not actually manifested.

Objectifs

L'objet de ce travail est de s'assurer du comportement des sulfures de fer qui peuvent être associés aux granulats calcaires mis en œuvre dans les bétons de ciment. L'étude a été réalisée, d'une part, par le Centre Expérimental du Bâtiment et des Travaux Publics (CEBTP), le Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC), le Laboratoire régional des Ponts et Chaussées (LRPC) de Lille et, d'autre part, par le CRIC. Elle se justifiait à l'origine par les propositions de révision de la norme française P 18-301 (Granulats naturels pour bétons hydrauliques). Cette norme publiée en 1983 fixait, dans son article 5-3-5, le seuil admissible en soufre total des granulats à béton à 0,4 % exprimé en SO_3 .

La révision proposait une réévaluation de ce seuil pour le fixer à 1 % en S, ce qui correspond à 2,5 % en SO_3 . Depuis, la normalisation européenne a précisé ces seuils*.

* Le projet de norme européenne PR EN 12 620 précise que la teneur totale en soufre (S) du granulat, mesurée conformément à l'article 11 de l'EN 1744-1: 1998, ne doit pas être supérieure à :

- 1 % de S en masse pour les granulats naturels ;
- 2 % de S en masse pour les laitiers de haut fourneau refroidi par air.

Note : il faut prendre des précautions particulières lorsque de la pyrrhotite, forme instable de sulfure de fer (FeS), est présente dans le granulat. Si la présence de ce minéral est avérée, il convient de réduire la teneur totale en soufre (S) à 0,1 %.

Rappel des faits, constatations sur ouvrages

La mise en cause des sulfures comme source de désordres n'est pas récente. Dans une publication datée de 1971, *Détérioration de béton due aux agrégats*, J. Bérard donnait plusieurs exemples de dégradations internes faisant intervenir les sulfures présents dans les granulats. Un certain nombre de publications se sont depuis intéressées à ce problème qui, est-il nécessaire de le rappeler, est très différent des taches de rouilles dues à l'oxydation en parement de pyrites massives.

Au cours des années 1980, il a été constaté des dégradations sur plusieurs ouvrages du nord de la France, que les études réalisées au LCPC et au CEBTP ont attribué soit au développement d'une réaction sulfatique dominante, soit à un couplage entre une réaction sulfatique et une alcali-réaction ou enfin à une alcali-réaction dominante.

Dans les cas où la réaction sulfatique apparaissait, caractérisée par la présence d'ettringite, seule ou couplée à l'alcali-réaction, les analyses reconnaissaient :

- le plus souvent une teneur en sulfures des granulats à la limite, ou au-delà du seuil fixé par la norme P 18-301 dans sa version de 1983 ;
- les granulats comme provenant des calcaires d'âge primaire de la région de Tournai (fig. 1 et 2).

Une démarche identique mais plus systématique a été réalisée en 1989-1991 sur des ouvrages belges. Cette étude conduite par le CRIC a couplé l'examen microscopique et l'analyse chimique de bétons âgés d'une vingtaine d'années, atteints ou non par l'alcali-réaction, connue aussi sous l'appellation RAS : ici réaction alcali-silice.

L'examen microscopique systématique a révélé que les pyrites ne montraient aucun signe d'altération, qu'il s'agisse de bétons sains ou de bétons fortement microfissurés. Par ailleurs, aucun des bétons dégradés par la RAS ne comportait d'ettringite, de gypse, ou tout autre composé de fer suspect, typique de l'oxydation des sulfures de fer (limonite, sulfates ferreux et/ou ferrique).

L'analyse chimique a été réalisée sur les bétons fortement dégradés par la réaction RAS, où la probabilité d'oxydation de la pyrite est exacerbée dans la mesure où l'existence d'un réseau de fissures favorise les entrées d'eau et d'oxygène.

Ces investigations visaient essentiellement à cerner l'impact d'une oxydation éventuelle de la pyrite sur la teneur en sulfates et en sulfures des bétons.

À l'époque, la norme belge NBN N12-101 autorisait 3,75 % en SO_3 dans les ciments : les analyses effectuées ont permis de vérifier que les teneurs en sulfates des bétons, rapportées à la teneur en ciment, se situaient en dessous du seuil normalisé, ce qui est un indice de la non-participation des sulfures issus des granulats, mais pas une preuve dans la mesure où la teneur initiale du ciment pouvait être largement inférieure à ce seuil.

Ces observations témoignaient de la stabilité de la pyrite, dont l'oxydation aurait immanquablement contribué à augmenter la quantité de sulfates dans le béton. Quant aux teneurs en sulfures de ces bétons, rapportées à la quantité de granulats, elles étaient tout à fait représentatives des teneurs en sulfures caractéristiques des roches prélevées en carrière, c'est-à-dire voisine de 1 % en SO_3 .

L'ensemble de ces investigations microscopiques et chimiques mettaient, pour les auteurs du rapport, clairement en évidence la stabilité des sulfures de fer constitutifs des calcaires du Tournaisis en matrice cimentaire.

Afin de lever les doutes concernant le rôle, éventuellement déterminant, des sulfures dans l'apparition des désordres, et ce dès le dépassement du seuil fixé par la norme P 18-301, et surtout afin de proposer à la normalisation européenne un seuil en deçà duquel il devenait possible de construire des ouvrages sans risque de voir apparaître des désordres, quatre laboratoires (CEBTP, LRPC, LCPC, CRIC) se sont rapprochés pour mettre en commun leurs efforts et bâtir un projet d'étude. Le groupement des producteurs du Tournaisis a décidé de son côté de s'impliquer financièrement et de participer à la mise en place du protocole expérimental.

Cette étude se devait de mettre en œuvre des matériaux contenant des teneurs croissantes en pyrite Fe S_2 . Elle se devait aussi d'éviter la coexistence d'une alcali-réaction, et enfin de ne pas négliger l'impact d'une microfissuration préalable susceptible d'initier la réaction sulfatique. Ces considéra-



Fig. 1 - Importance des fronts de taille dans les gisements qui exploitent les calcaires d'âge primaire du Tournaisis. Entre la surface topographique et la base du gisement, on peut compter dix banquettes d'une hauteur moyenne de 20 mètres.



Fig. 2 - Détail du front de taille.

tions nous ont conduits, dans le cadre d'un programme commun de recherche, à adopter la démarche suivante.

Protocole expérimental

L'étude a mis en œuvre des éprouvettes de béton $7 \times 7 \times 28$ cm réalisées conformément à la procédure de l'essai P 18-587. Le suivi de leur évolution a été assuré à la fois en variations dimensionnelles, chimiques et microstructurales.

Gravillons, sable et ciment ont été choisis de telle façon que le risque d'alcali-réaction soit autant que possible inexistant. Compte tenu de l'existence d'une phase siliceuse diffuse dans la matrice carbonatée des granulats, le choix d'un ciment faiblement dosé en alcalins s'imposait.

Les conditions d'environnement étant souvent déterminantes, les éprouvettes ont été testées de deux façons différentes :

- suivant un processus de conservation utilisant le réacteur des essais de la norme XP P 18-587, c'est-à-dire dans une ambiance à 100 % d'humidité relative et $38 \text{ }^\circ\text{C}$,
- en privilégiant les effets d'une cure alternant immersion et séchage (fig. 3).

Enfin, pour chaque cure, il a été réalisé une série que nous appellerons intacte et une série préalablement microfissurée par application d'une charge uniaxiale correspondant à 75 % de la charge de rupture en compression simple, celle-ci étant déterminée sur un lot d'éprouvettes homologues.

L'étude complète a donc nécessité la réalisation de quatre séries de cinq éprouvettes auxquelles il convient d'ajouter les éprouvettes ayant servi à la détermination de la résistance en compression.

Caractérisation des matériaux et formulation

Caractérisation

Les matériaux ont été caractérisés à partir de leur analyse chimique pour le ciment et d'une étude pétrographique au sens large pour les granulats.

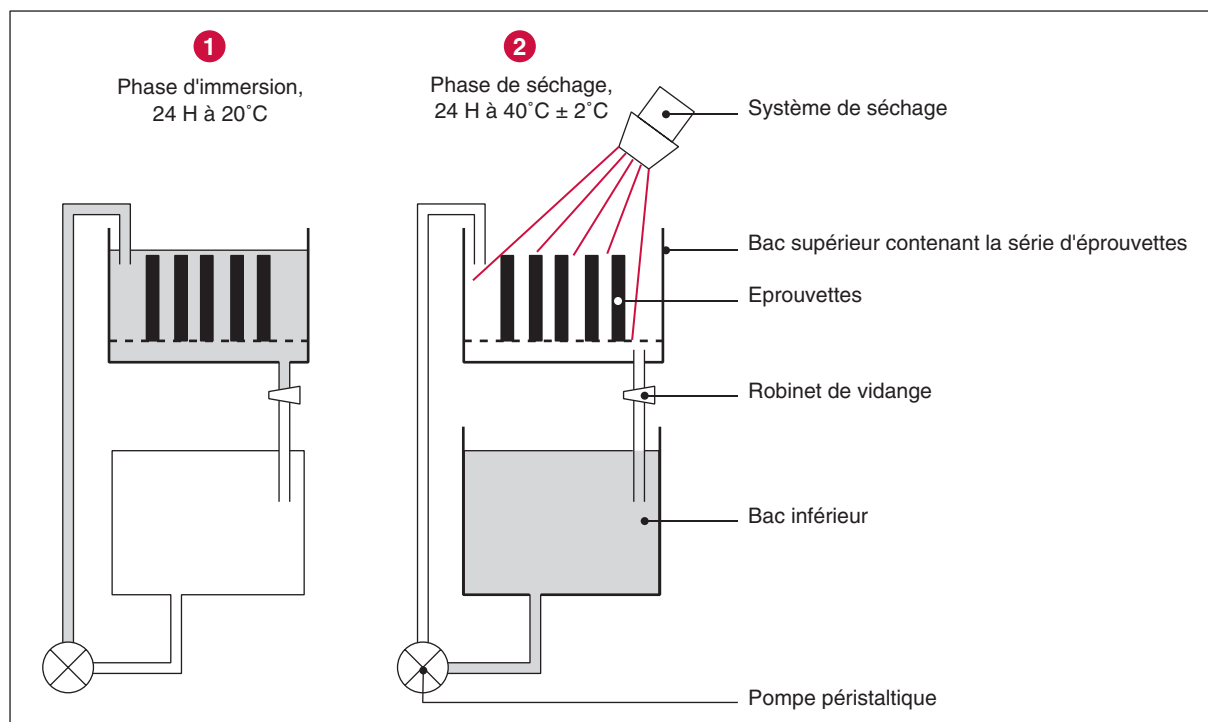


Fig. 3 - Schéma du système mis en œuvre pour la réalisation des cycles d'immersion-séchage.

Les granulats

Les analyses chimiques sont regroupées dans le tableau I.

Les échantillons 2, 3, 4 sont représentatifs de la diversité de matériaux exploités dans les gisements du Tournaisis. L'échantillon 5 plus riche en sulfure provient d'une formation différente. Sa présence dans notre échantillonnage est intéressante car elle devrait conforter les résultats et rassurer les utilisateurs quant au risque possible lié à la présence de sulfures.

TABLEAU I
Analyses chimiques des granulats

Éléments dosés	témoin calcaire exempt de sulfure		Granulats calcaires à teneurs croissantes en sulfures			
	Sable	Gravillons	Gravillons 5-20 mm			
	1		2	3	4	5
Perte au feu	40,0	43,40	40,00	36,90	34,35	33,49
SiO ₂	8,30	0,40	10,95	13,84	15,77	14,60
Al ₂ O ₃	0,50	0,10	1,34	1,84	3,66	5,39
Fe ₂ O ₃	0,70	0,10	0,24	0,44	0,97	2,18
MgO	0,80	0,30	1,42	1,85	1,47	5,72
CaO	49,90	55,50	46,72	44,03	42,33	35,70
K ₂ O	0,10	0,05	0,18	0,48	0,88	1,31
Na ₂ O	0,05	0,01	0,06	0,17	0,08	0,06
Soufre total en SO ₃	0,10	0,10	0,53	0,84	1,18	2,27
Soufre des sulfates en SO ₃	0,10	0,10	0,01	0,01	0,05	0,04
Soufre des sulfures en S⁼	0,00	0,00	0,21	0,33	0,45	0,89

De cette façon, notre échantillonnage couvre d'aussi près que possible l'étendue des teneurs en sulfures susceptibles d'être rencontrées dans les calcaires utilisés comme granulats à béton :

- 0,00 %, béton des éprouvettes témoins ; les granulats de cette série d'éprouvettes sont des granulats calcaires mais exempts de soufre à l'analyse chimique,
- 0,21 %, teneur proche du seuil de la norme P 18-301,
- 0,33 %, teneur correspondant à la valeur la plus fréquente du gisement,
- 0,45 %, teneur correspondant à la valeur supérieure du gisement,
- 0,89 %, teneur correspondant à des matériaux particulièrement riches en sulfures.

Outre les teneurs en sulfures variables d'une série à l'autre, les analyses chimiques montrent que les matériaux de l'étude ont une quantité de silice toujours supérieure à 10 %. Cette silice existe sous plusieurs formes :

- la plus banale : le quartz,
- la plus discrète : dans le réseau des argiles,
- la plus active : une forme diffuse qui justifie les précautions prises quant au risque d'alcali-réaction.

L'étude pétrographique en microscopie optique et en microscopie électronique à balayage nous a permis de visualiser dans la matrice carbonatée les espèces secondaires de la roche. Les figures 4 et 5 illustrent la présence de deux de ces espèces minérales.

On peut aussi observer un maillage constitué de petits éléments plats, approximativement hexagonaux qui, à l'analyse, est identifié comme de la silice. Une identification plus précise nécessitant une destruction totale de la phase carbonatée et un traitement approprié nous a permis de reconnaître que cette phase siliceuse était majoritairement composée de cristobalite basse température.

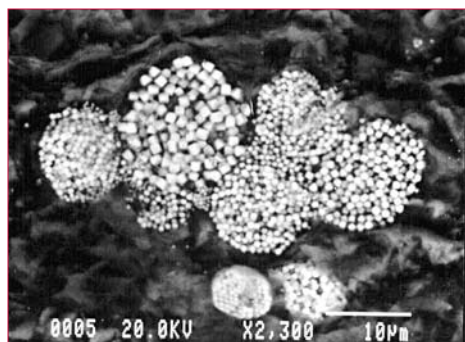


Fig. 4 – Framboïdes de sulfure de fer de quelques dizaines de micromètres de diamètre.

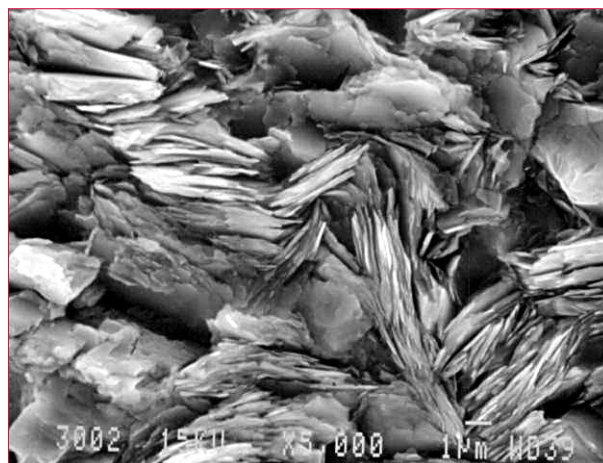


Fig. 5 – Minéraux argileux dans la matrice carbonatée.

Le ciment

Le ciment retenu a été choisi afin d'éviter qu'une alcali-réaction ne vienne perturber les essais. Dans la démarche préventive proposée par les recommandations pour la prévention des risques dus à l'alcali-réaction, une des solutions possibles offertes lorsque l'on est en présence de matériaux qualifiés de potentiellement réactifs est de limiter la teneur en alcalins du béton. Cette limitation passe en particulier par le choix d'un ciment à faible teneur en alcalins.

La teneur en alcalins équivalents du ciment choisi ne dépasse pas 0,2 %, ce qui est une garantie quant à l'absence de perturbation due à l'alcali-réaction.

Les résultats sont présentés dans le tableau II.

TABLEAU II

Analyse chimique du ciment et composition potentielle

Eléments dosés %	*CPA HP de Bussac
SiO ₂	20,40
insoluble	0,34
Al ₂ O ₃	5,35
Fe ₂ O ₃	3,86
MgO	0,74
CaO	64,04
(chaux libre)	0,18
SO ₃	3,06
K ₂ O	0,16
Na ₂ O	0,06
TiO ₂	0,00
P ₂ O ₅	0,00
MnO	0,00
Cl ⁻	0,006
Perte au feu	2,11
Na ₂ O équivalent	0,165

Composition potentielle	ASTM C 150-94	Bogue
% C ₃ S	58,1	57,3
% C ₂ S	13,7	14,3
% C ₃ A	7,6	7,6
% C ₄ AF	11,7	11,7
% CaSO ₄	5,2	5,2

Le pourcentage de C₃A correspond à une valeur courante pour un ciment. Le choix de cette valeur est important dans la mesure où une valeur faible pourrait être à l'origine d'une absence de réactivité sulfatique et donc pourrait fausser les résultats de l'étude.

* La nouvelle dénomination de ce ciment est : CEM I 52,5 N.

Formulation

La formulation des bétons est celle prescrite par la norme XP P 18-587.

Le béton a donc été dosé à :

- 410 kg/m³ de ciment ;
- 660 kg /m³ de sable 0-5 mm et
- 1 170 kg/m³ de gravillons 5-20 mm qui se répartissent en :
 - 390 kg de gravillons 5-10 mm,
 - 390 kg de gravillons 10-14 mm,
 - 390 kg de gravillons 14-20 mm.

Le slump de 10 ± 2 cm correspond à un dosage en eau de 210 litres.

Les teneurs en soufre sont croissantes depuis le béton témoin (1) dosé à 0 % de soufre des sulfures au béton (5) dosé à 0,89 % en passant par les bétons (2), (3) et (4) dosés respectivement à 0,21 %, 0,33 % et 0,45 %.

Résultats

Suivi des variations dimensionnelles en immersion-séchage

Les deux lots d'éprouvettes (microfissurées et intactes) ont été soumis à 180 cycles d'immersion-séchage soit douze mois d'essai dans le dispositif expérimental décrit et présenté sur la figure 3.

La durée choisie a paru suffisante pour rendre compte de l'apparition d'une réaction. En effet, les constatations et les essais antérieurs faisaient toujours apparaître un démarrage rapide de la réaction dans ces conditions.

Les mesures de variation dimensionnelles ont été faites au rétractomètre aux échéances suivantes : 0, 28, 60, 90, 120, 150, 180, 240, 300 et 360 jours.

Pour les deux lots d'éprouvettes aucun gonflement n'apparaît ; il y aurait même un léger retrait dû au séchage du béton au cours des cycles.

Les figures 6a et 6b rendent compte de ces résultats.

La variation dimensionnelle est exprimée en micromètres par mètre en fonction du temps en jours.

Le retrait constaté sur le lot ayant subi une microfissuration se retrouve ici. Toutes les éprouvettes sont affectées à des degrés divers. Les deux bétons les plus dosés en soufre montrent lors de la mesure intermédiaire à 30 jours un très léger gonflement. Cette observation semble traduire le fait que l'épisode de séchage déshydrate plus efficacement les éprouvettes que la phase d'immersion ne les réhydrate.

Cette procédure opératoire permet bien une agression des sulfures par oxydation mais il se peut que la phase d'hydratation soit insuffisante pour permettre à la réaction de s'exprimer complètement.

Suivi des variations dimensionnelles en réacteur à 38 °C et 100 % HR

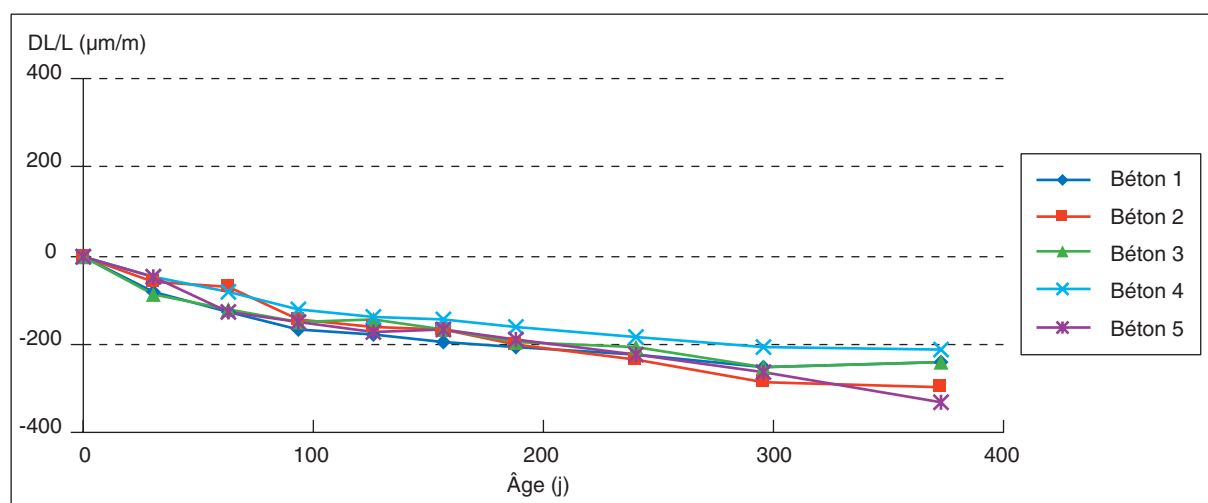
Protocole expérimental initial

Cette phase de l'étude réalisée au LRPC de Lille est probablement moins agressive que les essais d'immersion-séchage, mais plus proche des procédures habituelles sur béton.

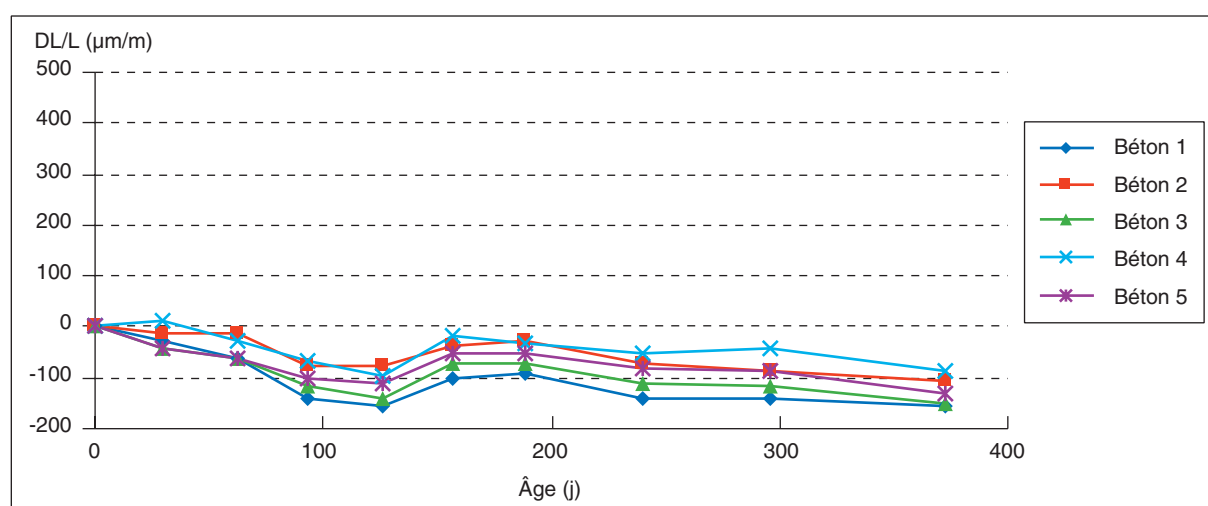
Dans ce protocole expérimental, la contrainte uniaxiale imposée pour assurer la préfissuration n'a été que de 65 % de la valeur de rupture.

Cette valeur a été préférée aux 75 % précédents pour éviter une rupture prématurée. À l'observation, elle est apparue suffisante pour permettre à une éventuelle réaction d'oxydation des sulfures d'enclencher la dégradation du béton.

Fig. 6 – Évolution des éprouvettes lors de l'essai d'immersion-séchage.



a. Éprouvettes microfissurées.



b. Éprouvettes intactes (non microfissurées).

Comme dans les essais d'immersion-séchage, il n'a pas été constaté, même après un an d'essai, de gonflements significatifs. Il n'y a pas non plus de différences notables entre les lots microfissurés et intacts.

Contrairement à la procédure opératoire par immersion-séchage, la teneur initiale en sulfures ne permet aucun classement.

Globalement, les éprouvettes ne montrent aucun gonflement, la formulation la plus riche en soufre présentant même un léger retrait (fig. 7).

Protocole expérimental modifié (milieu suralcalinisé)

La stabilité effective des cinq bétons confirme aussi qu'aucune autre réaction expansive interne ne s'est manifestée telle qu'en particulier l'alcali-réaction. Cette indispensable neutralité à l'alcali-réaction des bétons testés avait été obtenue, rappelons-le, par l'emploi d'un ciment à très faible teneur en alcalins. Cependant, comme il était possible qu'un niveau trop bas d'alcalins diminue la susceptibilité éventuelle des sulfures à l'oxydation par l'abaissement excessif de la basicité du béton, une série supplémentaire d'essais sur éprouvettes a été réalisée en alcalinisant artificiellement le béton (teneur en Na_2O équivalent porté à 1 % du poids de ciment). Le reste de la procédure a été identique à celle des essais sur éprouvettes non fissurées. Ce faisant, ces essais permettaient également de vérifier la réponse effective d'un essai dont la fonction est habituellement de tester le

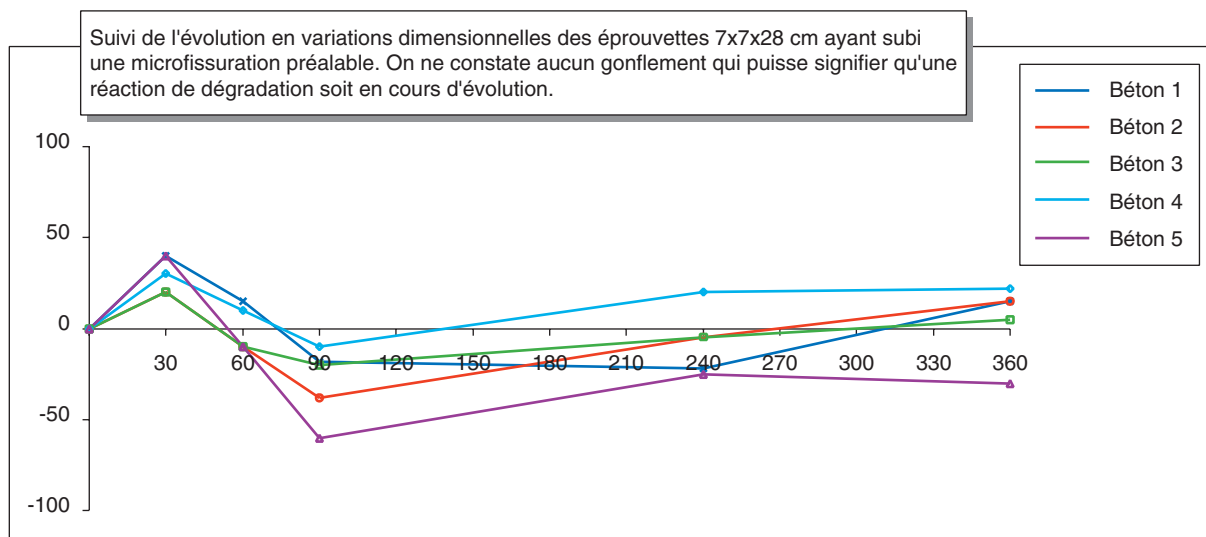


Fig. 7 – Évolution des variations dimensionnelles en réacteur.

TABLEAU III
Expansion des éprouvettes suralcalinisées

Formule	Teneur en sulfures des gravillons (%)	Expansion en $\mu\text{m/m}$ en fonction du temps			
		1 mois	3 mois	8 mois	12 mois
Béton 1	0.00	60	60	63	87
Béton 2	0.21	27	80	413	480
Béton 3	0.33	67	143	580	740
Béton 4	0.45	100	170	290	400
Béton 5	0,89	80	130	270	357

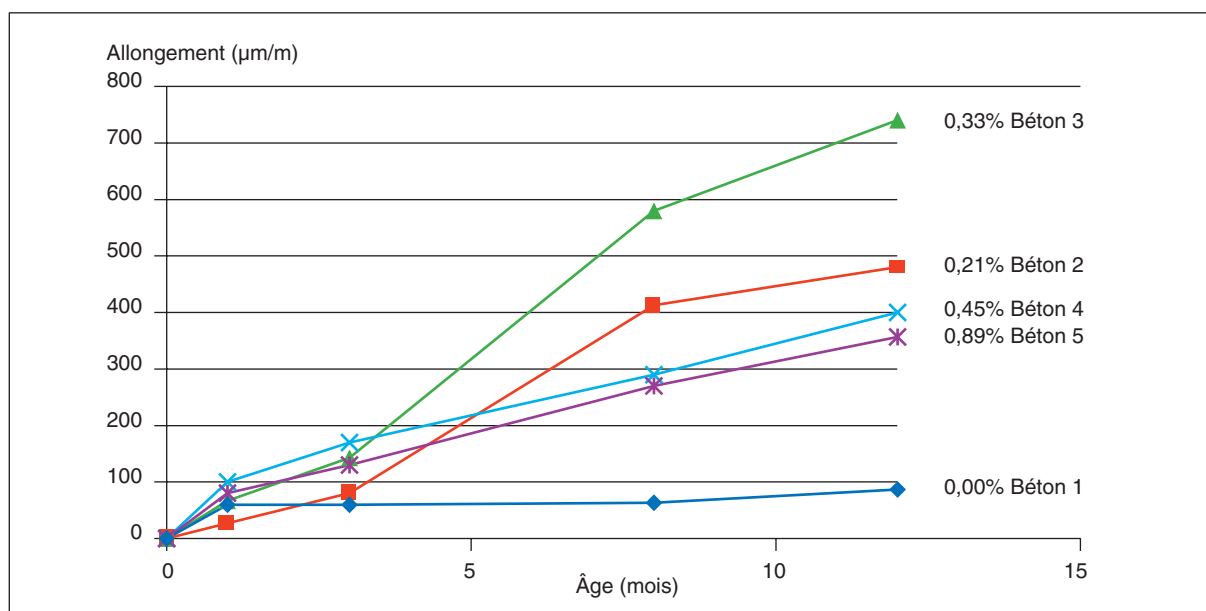


Fig. 8 – Expansion des éprouvettes à teneurs en soufre croissantes en milieu suralcalinisé.

caractère réactif d'un gravillon vis-à-vis de l'alcali-réaction ou le comportement expansif d'un béton les utilisant (tableau III).

Les résultats de ces essais, présentés sur la figure 8, montrent un net comportement expansif de quatre des cinq bétons testés, c'est-à-dire de ceux qui utilisent des granulats qui comportent des sulfures, mais qui sont également réactifs aux alcalins. Quel est, dans ce cas, la réaction à l'origine de ces expansions ?

La réponse est l'alcali-réaction ; deux observations le confirment :

- en premier lieu, on constate que la valeur finale de l'allongement des quatre bétons expansifs n'est pas du tout proportionnelle à la teneur en sulfures, ce qui aurait dû être le cas si les sulfures avaient été impliqués dans ces expansions ;
- ensuite, et ceci est déterminant, un examen au microscope électronique à balayage mené sur les deux bétons les plus expansifs révèle la présence de produits d'alcali-réaction en quantité importante et l'absence de néoformations d'ettringite, qu'aurait dû engendrer la réaction des sulfures si elle s'était produite.

Cette phase d'essais confirme donc bien la stabilité des sulfures des granulats testés quelle que soit la teneur en alcalins du béton.

Conclusion

Cette étude montre que les sulfures présents comme minéraux accessoires des calcaires n'entraînent aucune réaction expansive des bétons, dans nos conditions expérimentales, et ce, jusqu'à une teneur voisine de 1 % exprimée en soufre. Elle confirme ainsi la première étude réalisée par le CRIC. Cependant, nous sommes conscients de la difficulté qu'il y a à traduire par des essais accélérés le vieillissement naturel d'un béton. Les deux protocoles expérimentaux ont été réalisés sur une durée de douze mois, ce qui peut paraître un peu court pour représenter la vie d'un ouvrage. C'est cependant une durée sensiblement plus importante que celle des essais normalisés de qualification des granulats.

À l'issue des séries d'essais, aucun gonflement dû à l'oxydation des sulfures n'a été constaté. L'étude montre que les gonflements sont dus à l'apparition d'une alcali-réaction dans un milieu suralcalinisé ; elle permet aussi de préciser qu'il n'y a pas de synergie entre l'alcali-réaction et la réaction sulfatique.

La présence d'ettringite observée dans les bétons de certains ouvrages, associée ou non à des gels d'alcali-réaction, reste une réalité ; les réactions qui conduisent à son développement doivent donc être recherchées ailleurs. Les travaux actuellement en cours, conduits au LCPC par Loïc Divet, s'intéressent à ces causes.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

SHAYAN A., Deterioration of concrete surface due to the oxydation of pyrite contained in pyritic aggregates, *Cement and Concrete Research*, **18**, 1988, pp. 723-730.

CHINCHON YEPES J.S, *Influencia de la degradacion de sulfures de hiero contenidos en los aridos en la durabilidad del hormigon, Analisis de compuestos de azufre por DRX y FRX*, Thèse de doctor des Ciencias de géologia de l'Universidad de Barcelonna, 1989.

AFNOR, Norme XP P 18-587, *Granulats, Stabilité dimensionnelle des granulats en milieu alcalin, essai sur béton*, 1990.

AFNOR, Fascicule de documentation FD P 18-542, *Granulats courants pour bétons hydrauliques, Les critères de qualification des granulats vis-à-vis de l'alcali-réaction*, 1994.

LE ROUX A., OUALI A., RENARD M., NICOT E., *Importance des granulats dans l'enrichissement en alcalins de la solution interstitielle des bétons. Application à l'alcali-réaction*, 8e Congrès de l'Association internationale de géologie de l'ingénieur, Vancouver, septembre 1998.

LE ROUX A., ORSETTI S., Les réactions sulfatiques : conditions de formation, structure et expansion des minéraux secondaires sulfatés, *Bulletin des laboratoires des Ponts et Chaussées*, **225**, mars-avril 2000, pp. 41-50.

DIVET L., État des connaissances des causes possibles de réactions sulfatiques internes au béton, *Bulletin des laboratoires des Ponts et Chaussées*, **227**, juillet-août 2000, pp. 71-84.

Défauts d'aspect des parements en béton, Guide technique, LCPC, 1991.

Recommandations pour la prévention des désordres dus à l'alcali-réaction, Guide technique, LCPC, 1994.