

Utilisation de l'essai de performance sur béton pour la prévention du risque lié à la réaction alcali-silice

Exemple des bétons à base de calcaire Tournaisien produit par la « Carrière du Milieu » à Gaurain-Ramecroix (Belgique)

Pascal FASSEU*

Laboratoire régional des ponts et chaussées de Lille

Billy LEBON

Jacques VECOVEN

DTA Holcim France-Benelux

■ RÉSUMÉ

Dans la région Nord - Pas-de-Calais de nombreux ouvrages, dont le squelette du béton est constitué de gravillons de calcaire Tournaisien sont affectés par la réaction alcali-silice. Des études ont été effectuées sur des bétons comportant ces gravillons, afin d'en préciser le comportement réel et de rechercher des moyens d'inhiber les gonflements délétères du béton. Ces études ont essentiellement été fondées sur un essai de performance sur béton, qui consiste à mesurer l'allongement d'éprouvettes de béton conservées dans une atmosphère accélératrice de la réaction. Il a notamment été montré que l'association d'un sable non réactif et de granulats réactifs de cette carrière, telle que constatée dans les bétons des ouvrages dégradés, est très défavorable. À l'inverse, l'emploi du sable réactif de cette carrière avec ces mêmes gravillons conduit à des bétons stables. Des fines minérales, notamment les cendres volantes, apportent également une réduction de l'expansion du béton avec une efficacité variable selon leur nature et leur dosage. Les faits confirment ces résultats car aucun des nombreux ouvrages de plus de vingt ans construits avec du béton comportant des gravillons et du sable traité aux cendres volantes issus de la Carrière du Milieu ne présente de désordres imputables à la réaction alcali-silice.

Application of the performance test on concrete to prevent against risks related to the alkali-silica reaction: Example of concretes composed of Tournaisian limestone produced at the "Milieu" Quarry in Gaurain-Ramecroix (Belgium)

■ ABSTRACT

In France's Nord - Pas-de-Calais region near the Belgian border, many structures whose concrete skeleton contains Tournaisian limestone aggregates are adversely affected by the alkali-silica reaction. Studies were conducted on concretes containing these aggregates for the purpose of specifying actual behavior and seeking the means to inhibit deleterious swelling in the concrete. These studies were primarily based on a concrete performance test, which consists of measuring the elongation of concrete specimens conserved in a reaction-accelerating atmosphere. It was demonstrated that the association of a non-reacting sand and reactive aggregates from this quarry, as observed in deteriorated concretes and structures, is highly unfavorable. On the other hand, use of the reactive sand from this same quarry with these same aggregates leads to stable concrete products. Fines, in particular fly ash, also engender a reduction in concrete expansion with an efficiency rate that varies depending on both the type and concentration of these fines. Field observations have confirmed these results, as not a single one of the many structures - now more than 20 years old - built using concrete containing aggregates and sand with a fly ash additive from the Milieu Quarry display the type of disorders that may be ascribed to the alkali-silica reaction.

* AUTEUR À CONTACTER :

Pascal FASSEU

pascal.fasseu@equipement.gouv.fr

INTRODUCTION

En 1987, au cours de l'inspection d'un ouvrage d'art de la banlieue lilloise, on a remarqué la présence d'un grand nombre de fissures sur plusieurs parties de ce pont (chevêtres en béton armé et tablier en béton précontraint), construit dix ans auparavant. Une expertise détaillée a alors révélé

que le béton était le siège d'une réaction alcali-silice. Ce processus de dégradation du béton, à cette date peu connu en France, résulte d'une réaction chimique lente entre l'eau, les éléments alcalins du béton et la silice de certains granulats ; cette réaction provoque l'expansion et la fissuration du béton. L'importance des dégradations affectant l'ouvrage était telle qu'il s'est révélé nécessaire de procéder à sa démolition totale alors qu'il n'avait pas encore été mis en service.

Ce constat effectué sur le territoire français a été en partie à l'origine d'un grand nombre de travaux sur la réaction alcali-silice, tant pour l'étude de ce phénomène, et en particulier de son diagnostic, que de sa prévention.

Les granulats qui entraient dans la composition des bétons de cet ouvrage étaient, d'une part, un sable siliceux roulé du bassin du Rhin de la région de Wesel en Allemagne, et, d'autre part, des gravillons concassés calcaires provenant du bassin de calcaire Tournaisien et notamment de la « Carrière du Milieu » à Gaurain-Ramecroix. Le ciment était de type Portland sans ajouts. Ces formules de béton faisaient partie des compositions classiques et leur emploi était assez fréquent dans la construction des ouvrages de la région Nord.

À l'époque, les connaissances sur le phénomène de réaction alcali-silice étaient en France limitées et théoriques. En particulier, les méthodes permettant de qualifier les granulats (transposition des essais américains ASTM C227 et C289) n'étaient pas totalement opérationnelles et la fiabilité de leurs conclusions était souvent mise en cause. Elles n'avaient, en tout cas, jamais été appliquées aux matériaux locaux avant la découverte de ces désordres. Parmi ces granulats, le premier à être suspecté d'être impliqué dans la réaction alcali-silice fut, logiquement du fait de sa nature, le sable siliceux du Rhin, mais les soupçons se sont progressivement reportés sur les gravillons de Tournaisien dont la roche, bien que de constitution essentiellement calcaire, comporte un réseau de silice diffuse. Par la suite, après la mise au point des essais de qualification et leur validation [1], le caractère potentiellement réactif (PR) des calcaires Tournaisiens a pu être maintes fois confirmé [2-4].

Il convient de rappeler qu'à partir des années 1960-1970, l'augmentation des programmes de construction dans le bâtiment et les infrastructures avait créé d'importants besoins en matériaux. Pauvre en ce domaine, la zone périphérique de Lille s'approvisionnait à partir des grandes carrières de calcaire carbonifère Tournaisien. Ceci explique que de nombreux ouvrages réalisés avec ces bétons mixtes (sable roulé siliceux et gravillons concassés calcaires) soient actuellement concernés par la réaction alcali-silice, bien qu'ils le soient, le plus souvent, sans désordres structurels majeurs.

Face à ce constat, les acteurs du génie civil se mobilisèrent et, sur le plan de la prévention, les démarches se succédèrent aussi rapidement que la complexité du problème le permettait. Ainsi, après la création d'un comité spécialisé sur les réactions de dégradation interne par la direction des Routes le 2 août 1989, des « Recommandations pour la prévention des désordres dus à l'alcali-réaction », provisoires en 1991 puis définitives en 1994 [5], furent rédigées, largement diffusées et mises systématiquement en application dans les marchés publics de travaux. Ces recommandations préconisent d'adapter le niveau de prévention à l'importance de l'ouvrage et à son exposition. Dans le cas de prévention le plus sévère, mais le moins fréquent (niveau C), il est recommandé d'employer des granulats non réactifs (NR) mais, dans les cas courants (niveau B), les dispositions sont plus ouvertes et reposent sur la nécessité de satisfaire à une seule des six conditions suivantes :

1. l'étude du dossier carrière montre que les granulats sont non réactifs (NR),
2. limitation du bilan d'alcalins dans le béton,
3. satisfaction d'un critère de performance par une vérification expérimentale de la formule de béton du chantier,
4. formule de béton ayant des références d'emploi satisfaisantes et probantes,
5. incorporation dans le béton d'additions inhibitrices en quantité suffisantes,
6. emploi sous conditions de granulats potentiellement réactifs à effet de *pessimum* (PRP), principalement des silex.

Pour ce niveau B de prévention, il est donc envisageable d'employer des granulats non qualifiés vis-à-vis de la réaction alcali-silice, ou qualifiés de potentiellement réactifs (PR), si l'une des conditions 2 à

5 est formellement remplie. Parmi celles-ci, celle du critère de performance (condition 3) semble très intéressante puisqu'elle repose sur un essai dit de performance développé à l'origine par la profession cimentière et dont le mode opératoire figure dans le document « Recommandations pour la prévention des désordres dus à la réaction alcali-silice » (cf. encart page 14). L'essai, récemment normalisé par l'AFNOR (norme NF P 18-454 [6] et fascicule de documentation FD P 18-456 [7]), consiste à mesurer l'expansion d'éprouvettes de béton réalisées suivant la formule du chantier et conservées à la température de 60 °C en atmosphère saturée d'humidité. L'intérêt de cet essai est multiple :

- il reproduit le phénomène d'expansion dans des conditions de température et d'hygrométrie favorisant le développement de la réaction. L'accélération de la réaction n'est apportée que par des conditions de conservation optimales vis-à-vis de la réaction et ne met en jeu ni une suralcalinisation anormale du béton, ni un concassage des granulats ;
- il fait intervenir l'ensemble des composants du béton et permet ainsi de tester les effets inhibiteurs d'additions minérales (sous réserve d'une prolongation des essais) ;
- il permet de déterminer la sensibilité du béton aux alcalins et donc de connaître la marge de sécurité disponible, en particulier lorsque des granulats PR sont employés ;
- il peut constituer une vérification supplémentaire et ultime de la stabilité d'une formule de béton du chantier.

Le souhait des constructeurs régionaux de maintenir un potentiel suffisant d'approvisionnement en granulats et la nécessité pour les carrières de calcaire Tournaisien de garantir un emploi sans risque de leurs produits ont incité ces derniers à mener des études sur leurs matériaux dans le cadre d'une prévention de la réaction alcali-silice, comme par exemple l'étude des calcaires Tournaisiens de la carrière Cimescaut à Antoing [2].

C'est pour répondre à cet objectif que le Laboratoire régional des ponts et chaussées de Lille a réalisé une étude comportant une série de vingt et un essais de performance sur béton afin, à travers l'essai de performance, de rechercher le ou les composants (autre sable, additions minérales) aptes à réduire l'expansion du béton d'origine comportant du sable et des gravillons de calcaire Tournaisien fortement pressentis comme réactifs.

LES CALCAIRES TOURNAISIENS

Souvent connu sous le nom de « Pierre bleue », le calcaire carbonifère Tournaisien est exploité depuis des siècles comme pierre de construction, pierre à chaux, ciment et granulats. Ce calcaire dur d'âge primaire, formé il y a 300 millions d'années, provient du sous-étage géologique Tournaisien (classé par le géologue h1b) auquel il donne son nom. Avec le Viséen et le Namurien, qui le surmontent, le Tournaisien appartient au Dinantien, étage inférieur du Carbonifère.

Ce sont les assises supérieures du Tournaisien en stratifications horizontales et dont l'épaisseur est de près de 200 mètres qui sont exploitées par plusieurs carrières du bassin dont la « Carrière du Milieu » (figure 1). Cette configuration du gisement conduit à retrouver les mêmes produits au plan minéralogique et chimique dans toutes les carrières du bassin, ce qui explique la globalisation qui est généralement faite des phénomènes d'alcali-réaction à l'ensemble des producteurs de ces calcaires.

figure 1
Carrière du Milieu à
Gaurain-Ramecroix
(Belgique).



Le gisement de la Carrière du Milieu offre une réserve de 850 millions de tonnes. Il est exploité actuellement sur une superficie de 90 ha et jusqu'à une profondeur de 160 m. Les installations produisent annuellement 4 millions de tonnes de matériaux de construction (sables et gravillons secs et lavés, fillers, enrochements, remblais, etc.). Un tiers de la production est exporté vers la France et principalement vers la région Nord - Pas-de-Calais.

Les caractéristiques moyennes, mesurées en particulier sur le calcaire extrait à la Carrière du Milieu, sont les suivantes :

- masse volumique absolue : 2 700 kg/m³,
- porosité moyenne : 1,0 %,
- résistance à la compression : environ 200 MPa,
- résistance à la traction : 7,3 MPa,
- module d'élasticité en compression : 68 000 MPa,
- coefficient Los Angeles : 17-19,
- micro-Deval : 15-17,
- composition chimique moyenne : carbonates 85 %, silice 13 %, divers 2 %.

ESSAIS RÉALISÉS

Ces essais réalisés sur une période de quatre ans partent de la formule de base impliquée dans les désordres par réaction alcali-silice, c'est-à-dire celle comportant le squelette granulaire sable du Rhin et gravillons de calcaire Tournaisien, en l'occurrence ici ceux issus de la Carrière du Milieu.

Les constantes de la composition portent sur le dosage en ciment : 400 kg/m³ (20 essais avec un CEM I et 1 essai avec un CEM V) ainsi que sur l'origine des gravillons 4/6 mm et 6/20 mm provenant tous de la Carrière du Milieu. Il se confirmera par la suite que les granulats réactifs étaient bien les gravillons issus de diverses carrières du gisement de calcaire Tournaisien malgré leur taux de silice bas et très inférieur à celui du sable. L'étude précitée [2] montre d'ailleurs que cette réactivité des calcaires Tournaisiens dépend d'avantage du faciès de la silice dans la matrice carbonatée que de sa concentration.

Selon la nature du sable, le dosage en eau ainsi que la proportion entre sable et gravillons diffèrent légèrement. Les deux types de formules employées sont précisés dans le **tableau 1**.

tableau 1
Composition des bétons
d'essai.

Formules sable roulé du Rhin (NR)	Formules sable concassé calcaire (NR) ou sable de calcaire Tournaisien (PR)
Ciment400 kg/m ³	Ciment400 kg/m ³
Sable 0/5 (dont addition)640 kg/m ³	Sable 0/4 (dont addition)740 kg/m ³
Gravillons Tournaisien 4/6280 kg/m ³	Gravillons Tournaisien 4/6120 kg/m ³
Gravillons 6/20900 kg/m ³	Gravillons 6/20880 kg/m ³
Eau totale185 litres	Eau totale190 litres

Les variables dans la composition des bétons sont :

- la teneur en alcalins (Na₂O équivalent en kg/m³ de béton), qui diffère selon la provenance et la nature du ciment ;
- la nature du sable : siliceux non réactif du Rhin, sable calcaire non réactif (sable de référence Afrem C [8]), et enfin sable calcaire de concassage de calcaire Tournaisien de la Carrière du Milieu, matériau de même nature que les gravillons donc supposé potentiellement réactif (les études ultérieures ont confirmé ce point [4]) ;
- les additions minérales : cendres volantes silico-alumineuses de la centrale thermique d'Amercœur (Belgique), fillers de calcaire Tournaisien suivant deux états de finesse (broyage normal à surface massique de 9 000 cm²/g et surbroyage à 14 000 cm²/g).

Les principales caractéristiques des constituants employés sont indiquées dans le **tableau 2**.

tableau 2
Principales
caractéristiques des
matériaux.

CARACTÉRISTIQUES DES SABLES

	Nature pétrographique	Granulométrie Pourcentage de passant au tamis de (mm)								
		5	4	3,15	2,5	1,25	0,63	0,31	0,16	0,08
Sable du Rhin	Dépôt fluviatile Quaternaire Holocène 85 à 90 % quartz émoussés, 4 % silicates 3 % quartzite	97	95	94	93	88	77	39	1,4	0,4
Sable du Tournaisien	Calcaire Primaire Tournaisien : 5 à 33 % Silice diffuse dans une matrice carbonatée	100	96	91	87	52	33	15	8	1
1.1 Sable NR	1.2 Calcaire primaire Viséen pur 95 % CaCO ₃	100	99	95	90	66	49 +	32	11	3

CARACTÉRISTIQUES DES CENDRES VOLANTES D'AMERCOEUR

< 80 µm	< 40 µm	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Na ₂ O	K ₂ O	SO ₃	CaO libre	Perte au feu	Na ₂ O éq.
94	86	49,5	34,2	0,225	1,321	< 0,3	< 0,15	3,8	1,094

CARACTÉRISTIQUES DES FILLERS DE CALCAIRE TOURNAISIEN COMPOSITION CHIMIQUE

Élément (%)	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	S total (en SO ₃)	Perte au feu	Na ₂ O éq.
Filler 9 000	11,5	0,99	0,46	46,6	1,12	0,04	0,25	0,74	38,0	0,205
Filler 14 000	11,1	1,19	0,38	47,0	1,00	0,05	0,31	0,61	38,2	0,254

CARACTÉRISTIQUES PHYSIQUES

	Finesse Blaine (cm ² /g)	Granulométrie au laser Pourcentage cumulé de grains de dimension (µm)							Diamètre moyen (µm)
		64 µm	32 µm	16 µm	8 µm	4 µm	2 µm	1 µm	
Filler 9 000	9 000	93	80	65	50	36	24	12	8,2
Filler 14 000	14000	100	94	92	91	70	47	22	2,3

Une série de cinq essais (1 à 5) vise à étudier l'influence de la teneur en alcalins du béton à base de sable siliceux du Rhin sur l'expansion. Les essais 6, 7 et 8 (l'essai 8 est tiré de [3]) testent le remplacement du sable siliceux du Rhin par le sable calcaire non réactif avec divers taux d'alcalins, tandis que dans les essais 9 et 10 le sable du Rhin est remplacé par le sable calcaire de concassage de la Carrière du Milieu. Enfin, les essais 11 à 22 étudient l'effet de divers types et dosages d'additions minérales, cendres volantes, fillers calcaires, en association avec les sables du Rhin ou de calcaire Tournaisien.

L'ensemble des résultats portant sur des formules à base de gravillons de calcaire Tournaisien peut être comparé au béton témoin 23 (essai issu de [3]) à base exclusivement de granulats calcaires non réactifs.

La durée normale de l'essai est de 3 mois pour des granulats de nature minéralogique connue comme le sont les calcaires testés ici. Par contre, les mesures doivent être prolongées jusqu'à éventuellement un an lorsque le béton comporte des additions minérales telles que des cendres volantes dont l'effet sur la cinétique de la réaction est variable suivant leur nature.

Les critères de qualification d'une formule de béton à l'essai de performance donnés par le fascicule de documentation FD P 18-456 [7] sont, dans le premier cas, une expansion moyenne inférieure à 0,02 % à l'âge de trois mois, et inférieure à 0,03 % à 1 an pour des bétons comportant des additions minérales. Pour ces bétons, un critère de pente existe et permet une interprétation rapide (en 5 mois) des essais. L'exploitation de ce critère n'étant pas utile dans le cadre de cette étude, celui-ci n'a pas été pris en compte.

De manière à simplifier les comparaisons, les mesures ont été systématiquement menées jusqu'à l'âge de douze mois et les résultats jugés à cette échéance pour tous les types de béton, avec ou sans additions minérales, ciments composés, etc.

RÉSULTATS

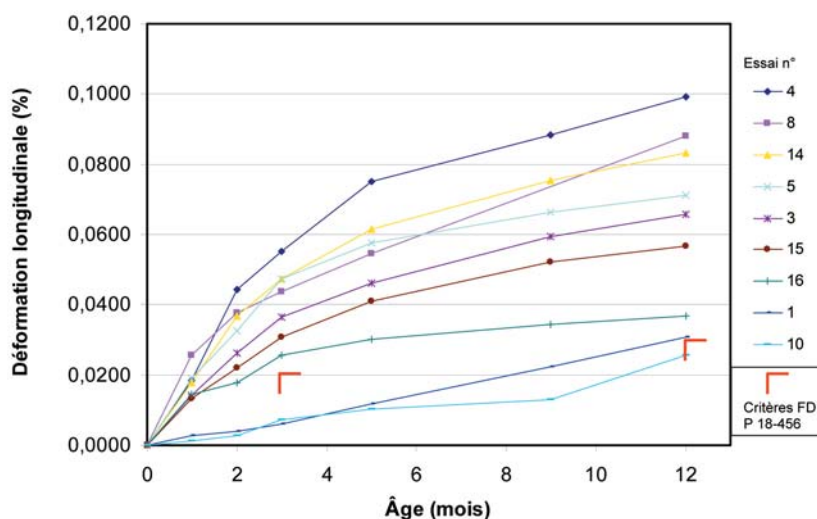
■ Cinétique de l'expansion (essais 1 à 23)

Le **tableau 3** donne les résultats obtenus pour l'ensemble des formules testées. Le graphique de la **figure 2** montre l'évolution de l'allongement des éprouvettes des bétons les plus expansifs (allongements supérieurs à 0,03 % à 1 an). On peut observer que, pour ces bétons, l'expansion à 3 mois représente en moyenne 55 % de l'expansion à 1 an. L'étendue de ce rapport (20 à 69 %) est assez importante mais ne trouve pas ici son origine dans la présence d'additions minérales actives. Néanmoins, on ne constate qu'une seule discordance entre les conclusions pouvant être tirées des mesures à 3 mois avec celles issues des mesures à 1 an. L'essai n° 1 qui satisfait largement le critère à 3 mois (0,0060 % pour 0,0200 %) n'est pas satisfaisant à 1 an, mais de très peu (0,0307 % pour 0,0300 %).

Les cendres volantes présentes dans les huit formules de bétons modifient nettement la cinétique des expansions, ainsi que le montre la **figure 3** où sont présentées les courbes d'expansion moyenne des formules avec cendres volantes (essais n° 12, 13, 17, 18, 21 et 22) et celles des mêmes formules sans cendres (essais n° 9, 10, 14, 16, 18, 19 et 20). Le rapport des allongements à 3 mois sur ceux à 1 an est ici de 19 % avec les cendres pour 51 % sans celles-ci. On note aussi le retrait dimensionnel systématique des bétons aux cendres dans les premiers mois, phénomène qui contribue finalement à réduire l'expansion de ces bétons.

En tout état de cause, les cendres volantes utilisées dans les présents essais ne semblent pas n'avoir qu'un simple effet retardateur, comme cela est parfois constaté et justifie l'allongement de la durée d'essai, mais bien de réducteur d'expansion, effet que l'on peut évaluer ici à 72 % à 1 an.

figure 2
Courbes de déformation
pour les bétons les plus
expansifs de l'étude.



Test	Essai N°	Type (4) et origine du sable		Addition minérale (en pour-cent de remplacement du sable)	Alcalins totaux actifs (Na ₂ O éq kg/m ³)	Déformation longitudinale en % à l'âge de (3) :					
						1 mois (4 sem.)	2 mois (8 sem.)	3 mois (12 sem.)	5 mois (20 sem.)	9 mois (39 sem.)	12 mois (52 sem.)
Influence de la teneur en alcalins	1	NR	Siliceux du Rhin		2,257	0,0028	0,0038	0,0060	0,0117	0,0223	0,0307
	2	NR	Siliceux du Rhin		1,061 ⁽¹⁾	– 0,0037	– 0,0030	– 0,0001	0,0015	0,0067	0,0139
	3	NR	Siliceux du Rhin		3,432	0,0143	0,0263	0,0365	0,0460	0,0593	0,0657
	4	NR	Siliceux du Rhin		4,205	0,0183	0,0443	0,0553	0,0751	0,0883	0,0991
	5	NR	Siliceux du Rhin		4,189	0,0191	0,0327	0,0472	0,0575	0,0664	0,0711
Influence de la nature du sable	6	NR	calcaire		2,045	0,0013	0,0050	0,0060	0,0073	0,0140	0,0160
	7	NR	calcaire		2,758	0,0093	0,0100	0,0103	0,0120	0,0187	0,0193
	8 ⁽²⁾	NR	calcaire		4,609	0,0256	0,0377	0,0437	0,0547	/	0,0880
Influence du sable Tournaisien	9	PR	Tournaisien		2,801	– 0,0007	0,0013	0,0020	0,0038	0,0087	0,0153
	10	PR	Tournaisien		4,095	0,0011	0,0028	0,0071	0,0104	0,0131	0,0257
Influence des additions minérales	11	PR	Tournaisien	8 % cendres volantes	2,193	– 0,0040	0,0007	– 0,0013	0,0037	0,0080	0,0100
	12	PR	Tournaisien	8 % cendres volantes	2,906	– 0,0007	– 0,0033	– 0,0017	– 0,0007	0,0053	0,0073
	13	PR	Tournaisien	8 % cendres volantes	4,216	– 0,0055	– 0,0031	– 0,0031	0,0049	0,0100	0,0149
	14	NR	Siliceux du Rhin	12 % filler Tournaisien 9 000 cm ² /g	4,367	0,0177	0,0369	0,0472	0,0615	0,0753	0,0831
	15	NR	Siliceux du Rhin	24 % filler Tournaisien 9 000 cm ² /g	4,528	0,0132	0,0219	0,0308	0,0411	0,0521	0,0568
	16	NR	Siliceux du Rhin	12 % filler Tournaisien 14 000 cm ² /g	4,375	0,0145	0,0177	0,0256	0,0303	0,0344	0,0369
	17	NR	Siliceux du Rhin	6 % cendres vol. + 6 % filler Tournaisien 9 000 cm ² /g	4,323	0,0005	– 0,0009	0,0065	0,0115	0,0141	0,0140
	18	NR	Siliceux du Rhin	6 % cendres vol. + 6 % filler Tournaisien 14 000 cm ² /g	4,331	– 0,0005	– 0,0035	0,0031	0,0075	0,0091	0,0096
	19	PR	Tournaisien	12 % filler Tournaisien 9 000 cm ² /g	4,274	0,0033	0,0060	0,0099	0,0123	0,0121	0,0149
	20	PR	Tournaisien	12 % filler Tournaisien 14 000 cm ² /g	4,291	0,0056	0,0079	0,0129	0,0145	0,0164	0,0176
	21	PR	Tournaisien	6 % cendres vol. + 6 % filler Tournaisien 9 000 cm ² /g	4,237	– 0,0036	– 0,0020	0,0019	0,0051	0,0047	0,0036
	22	PR	Tournaisien	6 % cendres vol. + 6 % filler Tournaisien 14 000 cm ² /g	4,246	– 0,0032	– 0,0003	0,0033	0,0059	0,0065	0,0040
Référence tout NR	23 ⁽²⁾	NR	calcaire	Gravillons calcaires NR de référence	4,096	0,0030	0,0030	0,0030	0,0030	/	0,0041

(1) Alcalins actifs d'un ciment CEM V.

(2) Étude extérieure [5].

(3) Une valeur positive correspond à un allongement, une valeur négative à un raccourcissement. En gras sont repérés les résultats ne satisfaisant pas les principaux critères de convenance du fascicule de documentation FD P 18-456 applicables aux bétons sans addition (allongement < 0,02 % à 3 mois) et aux bétons avec additions (allongement < 0,03 % à 1 an).

(4) NR : Granulats non réactifs à l'alcali-réaction, PR : Granulats potentiellement réactifs à l'alcali-réaction.

tableau 3

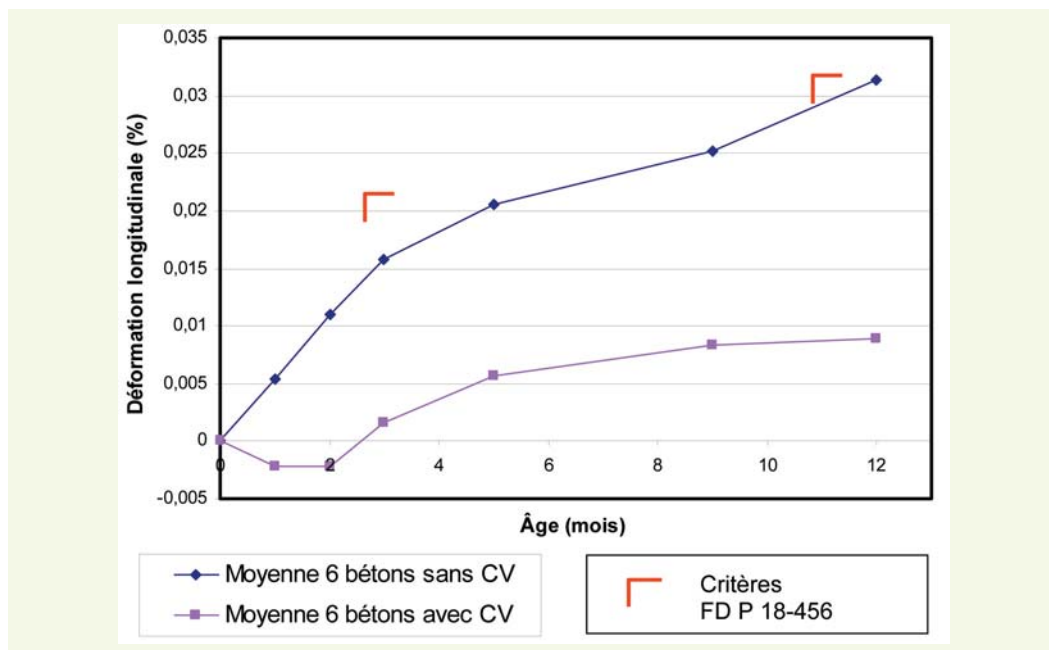
Essais d'expansion sur béton à base de gravillons calcaires Tournaisien.

■ Formule avec sable du Rhin – Influence de la teneur en alcalins (essais 1 à 5)

L'expansion du béton potentiellement réactif dépend directement de la teneur en alcalins du mélange. Celle-ci, exprimée en kilogrammes d'alcalins totaux actifs (Na₂O équivalent) par mètre cube de béton, a varié au cours des différentes étapes de l'étude selon le ciment employé. Dans ce total, les alcalins actifs pris en compte sont les alcalins totaux du ciment portland et des fillers calcaires.

figure 3

Expansions de bétons sans
(9, 10, 14, 16, 19 et 20) et
avec cendres volantes (CV)
(12, 13, 17, 18, 21 et 22)
au cours du temps.



Conventionnellement, ils ne sont pris qu'à 17 % des alcalins totaux pour les cendres volantes et qu'à 50 % pour ceux du laitier. Pour les granulats, ce ne sont que les alcalins libérables dans l'eau de chaux suivant la méthode LPC n° 37 [9] qui sont pris en compte.

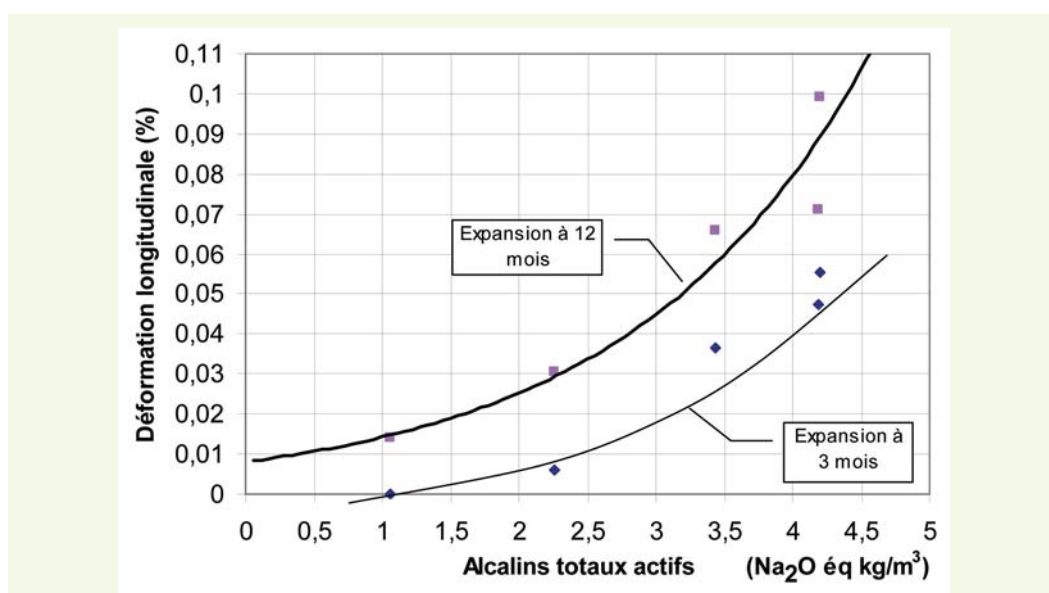
Comme le montre la **figure 4**, le béton à base de sable du Rhin et des gravillons de calcaire Tournaisien voit logiquement son expansion augmenter avec l'accroissement de la teneur en alcalins du mélange. Cette augmentation tend à s'amplifier pour les teneurs élevées en alcalins.

On constate que le critère à 3 mois est, par exemple, atteint pour une teneur en alcalins proche de 3 kg/m³, qui n'est pas particulièrement élevée et démontre la réelle sensibilité de la formule Rhin-Tournaisien aux alcalins. On notera que cette teneur de 3 kg/m³ est justement celle qui est fixée comme taux moyen limite en alcalins dans le document « Recommandations » [5], dans le cadre d'une prévention fondée sur un critère analytique (bilan en alcalins).

L'essai 5, presque identique à l'essai 4, (nouveau lot de ciment et teneur en alcalins légèrement différente ; cf. **tableau 3**) a eu pour objet la vérification des résultats donnés par ce dernier et a permis de constater une bonne répétabilité des conclusions tirées des essais (les deux concluent

figure 4

Expansions à 3 et 12 mois
selon la teneur en alcalins
avec le béton de sable du
Rhin et de gravillons de
calcaire Tournaisien.



nettement à la non-convenance du béton vis-à-vis de l'alcali-réaction), en dépit d'une étendue relative assez importante sur les mesures à 3 mois (16 %).

La relation entre l'expansion à 12 mois et la teneur en alcalins sert de témoin pour l'interprétation de la suite des essais : chaque formule testée, se caractérisant par une teneur en alcalins et une valeur d'expansion, peut être comparée, soit graphiquement à la courbe de cette fonction, soit numériquement par le calcul du pourcentage de réduction de l'expansion.

■ Sable non réactif calcaire (essais 6, 7, 8 et 23)

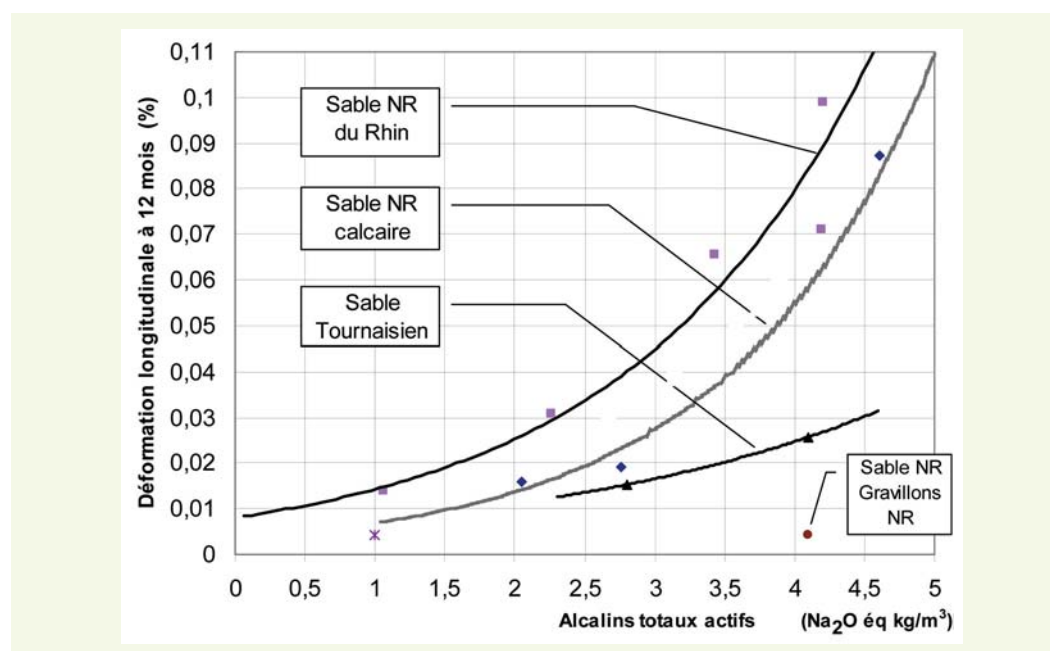
Le remplacement du sable du Rhin non réactif de nature siliceuse par un sable calcaire non réactif (sable de référence Afrem C [8]), a été effectué pour deux teneurs faibles en alcalins. Les résultats (figure 5) montrent que cette composition est moins réactive (réduction moyenne d'expansion 37 %) mais devrait dépasser néanmoins le critère pour les taux d'alcalins supérieurs à 3 kg/m³.

■ Sable de calcaire Tournaisien (essais 9, 10 et 23)

L'incorporation du sable de calcaire Tournaisien de la Carrière du Milieu (de nature identique à celle des gravillons et donc de réactivité *a priori* identique, ce qui sera démontré par la suite), réduit l'expansion dans une forte proportion, de l'ordre de 66 % (figure 5). Même avec un taux d'alcalins extrême de plus de 4 kg/m³, l'expansion à 3 mois (0,0071 %) reste largement inférieure au critère de stabilité à l'essai de performance (0,02 %).

Le comportement du béton se rapproche de celui d'un béton utilisant des granulats en totalité qualifiés de non réactifs (sable NR et gravillons NR) (essai 23), ce qui est assez surprenant mais encourageant pour l'emploi de ces matériaux.

figure 5
Expansion à 12 mois selon la teneur en alcalins - Effet de trois sables différents sur le béton de gravillons de calcaire Tournaisien - Témoin à base de sable NR et de gravillons NR.



■ Incorporation d'additions minérales (essais 10 à 21)

De nombreuses études démontrent que certaines additions minérales ont des effets réducteurs sur l'expansion due à la réaction alcali-silice. Les recommandations du ministère de l'Équipement prévoient d'ailleurs cette possibilité mais elle n'est pas mise en application actuellement du fait du manque d'expérience sur l'efficacité à long terme de ces additions.

Outre ces effets, certaines additions apportent au béton d'autres propriétés avantageuses comme l'augmentation de la compacité et l'amélioration de l'ouvrabilité et de la tenue en milieu agressif.

C'est à cette fin uniquement qu'une étude antérieure avait été menée au LRPC de Lille et avait abouti à un sable de granularité spécifique traité avec 8 % de cendres volantes de centrale thermique sèches. L'apport d'un tel traitement aux cendres, pouvant être favorable à la prévention de l'alcali-réaction, a donc été testé pour le sable de calcaire Tournaisien issu de la Carrière du Milieu et pour le sable du Rhin.

Enfin, ayant démontré que la réduction de la taille des grains de roche PR diminuait l'expansion du béton (cf. essais 9 et 10 avec le sable PR), il était permis d'espérer que l'incorporation de cette même roche avec un état de finesse encore plus grand pouvait être encore plus favorable (de tels résultats positifs avaient d'ailleurs été déjà obtenus [2]). Un filler calcaire sous deux états de mouture, de surface spécifique Blaine 9 000 et 14 000 cm²/g, issu du calcaire Tournaisien de la Carrière du Milieu, a donc été testé, seul et en combinaison avec les cendres volantes. Faute d'essais adaptés à leur état de finesse au même titre que des cendres volantes ou des fumées de silice, les fillers n'ont pas été qualifiés directement vis-à-vis de la réaction alcali-silice. Rappelons simplement que la roche dont sont issus ces fillers est qualifiée de PR, ce qui serait donc censé s'appliquer à tous les matériaux qui en proviennent.

L'ensemble des résultats de ces tests est présenté sur les figures 6 et 7 et dans les tableaux 4 et 5.

figure 6

Expansion à 12 mois selon la teneur en alcalins - Comparaison de l'effet de diverses additions minérales dans le béton de sable du Rhin - gravillons de calcaire Tournaisien.

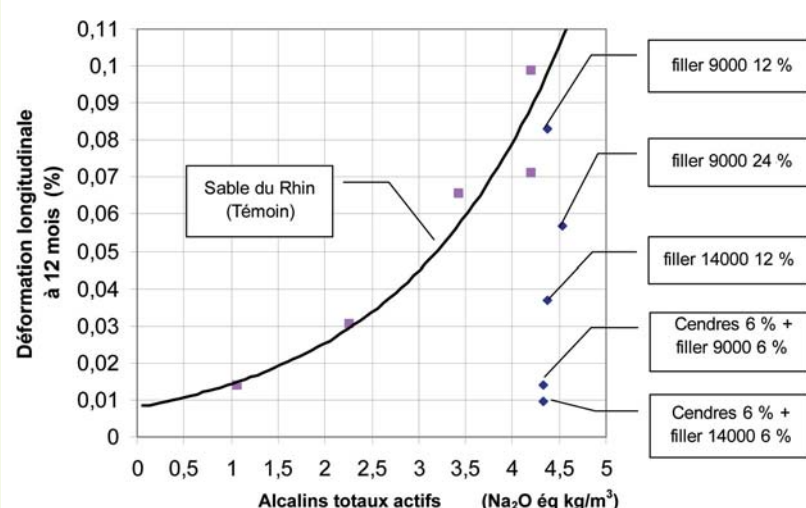


figure 7

Allongement à 12 mois selon la teneur en alcalins - Effet d'additions minérales dans le béton tout Tournaisien.

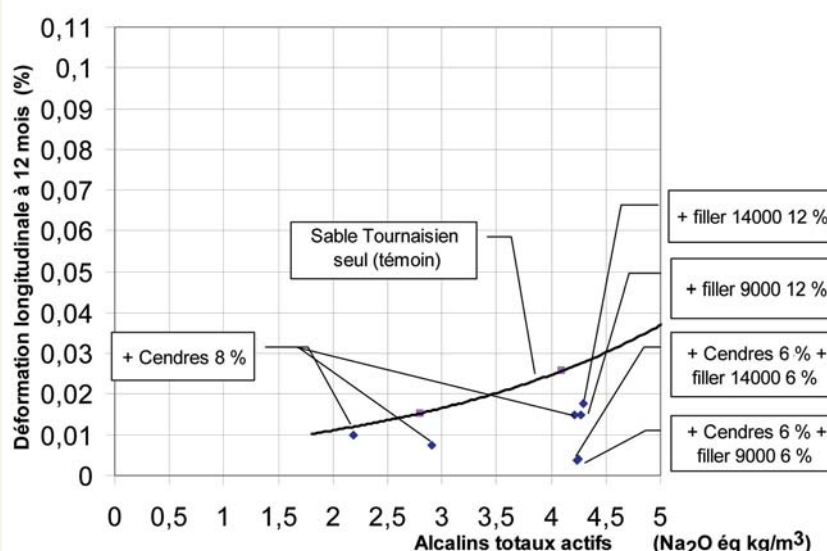


tableau 4

Effet des additions sur le béton Rhin-Tournaisien.

Nature et dosage de l'addition par rapport au sable	Réduction de l'expansion (classement par ordre décroissant d'efficacité)
Cendres volantes 6 % + filler 14 000 6 %	90 %
Cendres volantes 6 % + filler 9 000 6 %	85 %
filler 14 000 12 %	63 %
filler 9 000 24 %	47 %
filler 9 000 12 %	15 %

tableau 5

Effet des additions sur le béton tout Tournaisien.

Nature et dosage de l'addition par rapport au sable	Réduction de l'expansion (classement par ordre décroissant d'efficacité)
Cendres volantes 6 % + filler 9 000 6 %	87 %
Cendres volantes 6 % + filler 14 000 6 %	85 %
filler 9 000 12 %	46 %
Cendres volantes 8 %	39 %
filler 14 000 12 %	37 %

Les résultats des essais confirment l'effet réducteur sur l'alcali-réaction apporté par les additions minérales, surtout avec la formule la plus réactive, c'est-à-dire celle à base de sable du Rhin, où l'on atteint 85 à 90 % de réduction d'expansion à 1 an avec la combinaison de 6 % de cendres et 6 % de filler calcaire (**tableau 4**, **figure 6**). Parmi ces deux additions, ce sont les cendres qui paraissent les plus actives sur ce plan, l'efficacité du filler calcaire seul n'étant que de 15 % à 63 % selon son dosage et sa finesse.

Avec le béton à base de sable de calcaire Tournaisien de la Carrière du Milieu (**tableau 5** et **figure 7**), le gain en valeur absolue est moindre car ce sable offre déjà un important effet inhibiteur, comme les essais antérieurs l'ont montré. On observe néanmoins que la meilleure combinaison (cendres volantes 6 % + filler 9 000 6 %) conduit à une efficacité de 87 %, c'est-à-dire que l'expansion devient alors quasiment nulle (0,0036 % à 1 an). Ici encore, ce sont les cendres qui ont la plus grande action inhibitrice.

Si l'on compare la formule comportant le sable du Rhin seul à celle utilisant le sable de calcaire Tournaisien avec 8 % de cendres volantes, il est intéressant de constater que la réduction de l'expansion de cette formule par rapport à la première est de 83 % (**figure 8**).

Ce résultat traduit bien les constatations du terrain car les bétons « tout calcaire » employant ce sable corrigé aux cendres produit industriellement depuis 1976 par la Carrière du Milieu et désigné « SLCV 0/4 » ont eu de nombreuses applications en construction d'ouvrages d'art sans qu'aucune ne présente de dégradation ni de manifestation de réaction alcali-silice (**figures 9** et **10**).

figure 8

Allongement à 12 mois selon la teneur en alcalins - Comparaison des bétons de sable du Rhin et de sable Tournaisien seul et avec cendres volantes.

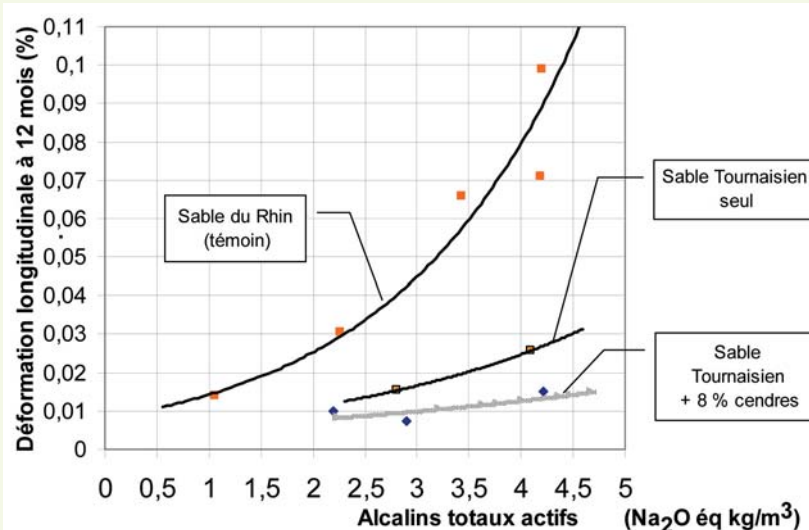


figure 9

Ouvrage d'art PS 32 de l'autoroute Lille-Valenciennes réalisé en béton tout calcaire Tournaisien âgé de 26 ans sans manifestation de réaction alcali-silice.



figure 10

Écluse du grand Carré à Lille sur la Deûle réalisée en béton tout calcaire Tournaisien âgé de 28 ans exempt de manifestation de réaction alcali-silice.



CONCLUSIONS

L'étude menée sur les granulats calcaires Tournaisiens produits par la Carrière du Milieu à Tournai apporte des informations utiles sur le comportement des bétons utilisant ces matériaux vis-à-vis de l'alcali-réaction, qui confirment et complètent les travaux déjà réalisés [2] ; il apparaît ainsi que :

- les formules à base de sable NR du Rhin et de gravillons PR de la Carrière du Milieu sont effectivement sensibles aux alcalins et conduisent à une expansion qui dépasse les critères de l'essai de performance pour une teneur en alcalins à peine supérieure à 3 kg/m³ ;
- la substitution du sable NR du Rhin par du sable NR calcaire n'a que peu d'incidence, mais son remplacement par le sable PR de la Carrière du Milieu réduit fortement l'expansion du béton en présence d'alcalins : le critère de performance est largement satisfait ;
- l'association de gravillons calcaires PR de la Carrière du Milieu et d'un sable de même nature aboutit à un béton ayant un comportement qui se rapproche de celui employant des granulats NR pour les taux d'alcalins étudiés. Cet effet de réduction d'expansion est renforcé avec une incorporation de cendres volantes dosées à 8 %, comme c'est le cas pour le sable produit industriellement, dénommé « SLCV 0/4 », de la Carrière du Milieu ;
- un ajout d'additions minérales dans le sable a un effet inhibiteur dont l'importance varie selon la nature et le dosage de ces additions et selon le béton (couple sable-gravillons) dans lequel elles sont ajoutées ;

- les cendres volantes, pour le moins celles de la centrale d'Amercœur employées ici, sont plus efficaces que les fillers calcaires, l'action de ces dernières étant d'autant plus favorable qu'elles sont plus fines et que leur dosage est plus élevé.

Ceci démontre donc bien qu'il est possible d'allier prévention des désordres dus à l'alcali-réaction et emploi de granulats qualifiés de « potentiellement réactifs » comme ceux produits à la Carrière du Milieu à Gaurain-Ramecroix, soit en utilisant comme fraction fine le sable 0/4 calcaire issu des mêmes installations, soit (ou en plus) en incorporant des additions minérales inhibitrices de l'alcali-réaction telles que des cendres volantes de type Amercœur.

Le constat de l'action inhibitrice d'un sable PR vis-à-vis de gravillons PR de même origine est rare. Il s'apparente à l'effet de *pessimum* présenté par les granulats PRP hautement réactifs aux alcalins mais avec lesquels on n'observe pas de désordres, à condition que la proportion dans le béton de ces granulats PRP, des silex en l'occurrence, soit suffisamment importante. Ce phénomène, qui est lié à la nature de la silice contenue dans la roche, est dans le cas des calcaires Tournaisiens très avantageux et utile et il n'est pas impossible que d'autres roches PR présentent aussi cette particularité.

Enfin, reposant intégralement sur l'essai de performance, cette étude révèle tout l'intérêt de cet essai, le seul actuellement qui permette de tester la formule d'un béton de chantier, dans un objectif de prévention pragmatique de la réaction alcali-silice conciliant la préservation des ressources naturelles en matières premières et la durabilité des ouvrages. On notera en particulier que le seuil d'acceptation de l'expansion d'un béton contenant des additions minérales suffisamment actives, qui est de 0,03 % à 1 an, peut être respecté même avec des granulats réactifs.

Essai de performance pour déterminer la stabilité d'un béton vis-à-vis de l'alcali-réaction (Norme NF P 18-454)

PRINCIPE

Ce test de longue durée vise à vérifier la stabilité dimensionnelle de béton vis-à-vis d'éventuelles réactions expansives interne de type alcali-silice dans le cadre d'une étude préliminaire ou de contrôle de chantiers de béton.

Il se pratique sur un groupe de trois éprouvettes $7 \times 7 \times 28$ cm confectionnées soit à partir du béton mis en œuvre sur le chantier, soit avec un béton fabriqué en laboratoire avec les constituants et selon la formule prévue pour les travaux (ou toutes variantes possibles).

Dans le cas d'une fabrication en laboratoire, il est nécessaire de disposer des constituants permettant la fabrication de 30 litres de béton, soit environ 20 kg de ciment, 30 kg de sable, 40 kg de gravillons, ainsi que les adjuvants et additions éventuels.

Au besoin, une suralcalinisation peut être apportée au ciment dans le but de prendre en compte la variabilité de la composition de ce dernier ou de rechercher la marge de sécurité disponible vis-à-vis de désordres par alcali-réaction.

Les éprouvettes ainsi confectionnées sont conservées dans une ambiance favorable et accélératrice des réactions expansives (air saturé en humidité à 60°C) ; leur déformation longitudinale est régulièrement relevée.

La durée de l'essai dépend de la nature des composants du béton. Elle est comprise entre 3 mois et 1 an.



MATÉRIEL

- Mini-malaxeur à béton (10 litres à 20 litres).
- Cône de mesure de consistance.
- Moules $7 \times 7 \times 28$ cm avec plots.
- Réacteur et conteneur de conservation en ambiance contrôlée.
- Banc de mesure dimensionnelle.

CRITÈRES DE QUALIFICATION (FD P 18-456)

Une formule de béton est déclarée apte à l'emploi si les critères suivants sont respectés :

Béton avec ciment CEM I et sans additions minérales

Un critère d'allongement à 3 mois : $D_m < 0,02 \%$ et $D_i < 0,025 \%$ (*).

Pour les bétons à base de granulats de nature autre que bien identifiée et classée dans les calcaires, grès, quartzites, silico-calcaires, silex, chailles et cherts, l'échéance est portée à 5 mois.

Bétons avec autres ciments et/ou avec additions minérales

Un critère d'allongement à 5 mois : $D_m < 0,02 \%$ et $D_i < 0,025$.

Et deux critères de pente :

- Au moins deux des trois valeurs ΔD_m des 3^e, 4^e et 5^e mois $< 0,0025 \%$.
- Somme (ΔD_m 3^e mois + ΔD_m 4^e mois + ΔD_m 5^e mois) $< 0,01 \%$.

Les critères de pente peuvent être remplacés par un critère d'allongement à 12 mois : $D_m < 0,03 \%$ et $D_i < 0,035 \%$.

(*) D_m = valeur moyenne de la déformation longitudinale des 3 éprouvettes.
 D_i = valeur individuelle de déformation longitudinale.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- 1 **BOLLOTTE B.**, « Developpement of an accerated performance test on concrete for evaluating its resistance to AAR », *9th international conference on alkali-aggregate reaction in concrete*, Londres, **1992**, pp. 110-116.
- 2 **GUEDON-DUBIED J.-S.**, **CADORET G.**, **DURIEUX V.**, **MARTINEAU F.**, **FASSEU P.**, **VAN OVERBECKE V.**, Étude du calcaire Tournaisien de la carrière Cimescaut à Antoing (Belgique) Analyse pétrographique et chimique et réactivité aux alcalins, *Bulletin des laboratoires des ponts et chaussées*, **226**, **2000**, pp. 57-66.
- 3 **CORNEILLE A.**, **BOLLOTTE B.**, « Results of a Round Robin Test Program for the Validation of the Test Methods in the French Recommendations for the Prevention of AAR Damage to Concrete », *Congrès sur la Durabilité des bétons*, Nice, **1994**, pp. 725-740.
- 4 **LARIVE C.**, *Apports combinés de l'expérimentation et de la modélisation à la compréhension de l'alcali-réaction et de ses effets mécaniques*, ERLPC, Laboratoire central des ponts et chaussées, Paris, **1998**.
- 5 *Recommandations pour la prévention des désordres dus à l'alcali-réaction*, Laboratoire central des ponts et chaussées, **1994**, 51 pages.
- 6 *Béton – Réactivité d'une formule de béton vis-à-vis de l'alcali-réaction – Essai de performance*, NF P 18-454, AFNOR, décembre **2004**.
- 7 *Béton – Réactivité d'une formule de béton vis-à-vis de l'alcali-réaction – Critères d'interprétation des résultats de l'essai de performance*, FD P 18-456, AFNOR, novembre **2004**.
- 8 **BERTRANDY R.**, Granulats de référence nationaux, *Séminaire AFREM/MRT ESPCI*, Paris, **1992**, pp. 165-175.
- 9 *Essai de granulats – Détermination des alcalins solubles dans l'eau de chaux*, Méthode d'essai des Laboratoires des ponts et chaussées, **37**, **1993**, 13 pages.