

## Alcali-réaction

Importance de la connaissance pétrographique  
dans la démarche préventive

**André LE ROUX**

Directeur de recherche  
Chef de la section Géologie et matériaux naturels  
Division Mécanique des sols et géologie de l'ingénieur  
Laboratoire central des Ponts et Chaussées

**Abdellah OUALI**

Laboratoire de Géologie des bassins sédimentaires  
Université Pierre et Marie Curie

**Jeanne-Sylvine GUÉDON-DUBIED**

Ingénieur des Travaux publics de l'État  
Section Géologie et matériaux naturels  
Division Mécanique des sols et Géologie de l'ingénieur  
Laboratoire central des Ponts et Chaussées

L'alcali-réaction n'est qu'une des causes possibles de dégradation des bétons et encore, n'est-elle pas la plus souvent rencontrée. Elle trouve son origine dans l'existence d'un déséquilibre entre certains minéraux et les solutions interstitielles qui les entourent. Pour s'en prémunir, le comité français alcali-réaction\* a proposé une démarche préventive. Cette démarche, fondée essentiellement sur des critères techniques, ne néglige pas pour autant les aspects économiques et psychologiques. C'est ainsi que, pour un ouvrage donné, la solution retenue dépendra, entre autres, du niveau de risque que l'on est prêt à accepter, de l'environnement de l'ouvrage et de l'importance qu'on lui accorde.

Sur le plan technique, la connaissance des composants du béton et en particulier des granulats, qui représentent 80 % du matériau, est exigée pour les ouvrages de catégorie C (tableau I). Pour ceux classés en catégorie B, cette

exigence n'est explicitement demandée que lorsque l'on utilise des granulats non réactifs.

La caractérisation des granulats doit être conforme à la démarche recommandée par le fascicule de documentation AFNOR **P 18-542**. Si, par méconnaissance, légèreté ou souci d'économie la méthodologie telle qu'elle est proposée devait être tronquée, il n'y aurait plus aucune garantie quant à la prévention des risques. C'est ainsi qu'il faut être très attentif aux fausses solutions comme, par exemple, la déclaration de non réactivité d'une fourniture sur la base d'un essai dont le choix ne serait pas issu d'une connaissance pétrographique conforme à la démarche recommandée ou encore serait réalisé sur un échantillonnage non représentatif.

Le recours à toute la panoplie d'essais ne constitue nullement un rempart plus solide contre l'apparition de désordres. Tout au plus, court-on le risque de prendre une mauvaise décision. De même, il faut être attentif à ne pas surdimensionner la démarche pétrographique. Elle devra être adaptée au matériau qui doit être mis en œuvre et à la connaissance que l'on peut avoir (ou que l'on est en droit d'exiger) des autres constituants.

**Note**

**technique**

## Rappel sommaire de la démarche préventive

### Choix du niveau de prévention

Ce choix met en œuvre une démarche basée sur des critères objectifs comme l'environnement dans lequel se situera l'ouvrage, sa caractérisation, sa localisation, son importance stratégique et économique, sa dimension, sa destination, les contraintes qui seraient générées par des interventions de maintenance... Ceci étant, la décision d'appartenance à une catégorie donnée est de la responsabilité du maître d'ouvrage.

À partir de cette décision, le document propose un niveau de prévention, parmi trois niveaux possibles A, B ou C.

À chaque niveau correspond un type de précautions. Cet ensemble constitue la démarche préventive, dont le déroulement détaillé est présenté dans le document *Recommandations pour la prévention des désordres dus à l'alcali-réaction*.

TABLEAU I  
Choix du niveau de prévention en fonction de la catégorie d'ouvrage et de son exposition (extrait du document recommandations...)

Classe d'environnement / Catégorie d'ouvrage	1 sec ou peu humide	2 humide et eau	3 humide avec gel et fon- dant	4 milieu marin
I. Risque faible - acceptable	A	A	A	A
II. Risque peu tolérable	A	B	B	B
III. Risque inacceptable	C	C	C	C

\* Lettre du Directeur des Routes du ministère de l'Équipement et du logement portant création du comité de suivi et d'évaluation des recherches relatives à la dégradation interne des bétons en date du 2 août 1989.

## Précautions associées

### Niveau A

Aucune précaution particulière ne s'impose vis-à-vis de l'alcali-réaction. Les seules exigences sont les règles habituelles de construction.

### Niveau B

Dans ce cas, qui intéresse la majorité des ouvrages de génie civil, six solutions sont théoriquement possibles. Globalement, ces solutions autorisent l'emploi de tous types de granulats, il suffit qu'une de ces solutions soit mise en œuvre pour se mettre à l'abri du risque. De ce fait, elles sont adaptées à l'utilisation des granulats potentiellement réactifs.

### Niveau C

Dans ce cas, le béton demande pour sa confection que soient utilisés des granulats non réactifs (NR) ou encore, à défaut, des granulats caractérisés comme potentiellement réactifs à effet de pessimum (PRP).

Le document *Recommandations pour la prévention des désordres dus à l'alcali-réaction*, autorise, lorsqu'il n'y a pas d'autre possibilité, l'emploi de matériaux reconnus potentiellement réactifs (PR) pour cette catégorie d'ouvrages à la condition qu'il soit procédé à une étude approfondie de la formulation envisagée sur des bases expérimentales définies contractuellement.

Une méthode possible, en cours de vérification, consiste à mettre en évidence, à partir d'une expérimentation sur éprouvettes de béton, le seuil en alcalins à partir duquel les désordres apparaîtront. Cette méthode suppose une caractérisation des granulats, une connaissance des alcalins actifs, mais aussi du temps puisque les essais, suivant la norme P 18-587 modifiée, dureront un an.

La démarche préventive, dont la philosophie peut se résumer en trois points :

– responsabiliser les acteurs de la construction,

– gérer au mieux les ressources naturelles,  
– construire durablement au meilleur coût,

implique une connaissance minimale des constituants envisagés, entre autres des granulats, c'est-à-dire de leur pétrographie et de l'homogénéité du gisement, associée à une qualification de leur réactivité au moyen d'un essai normalisé adapté.

## Apport de la pétrographie

Les résultats de la pétrographie vont être utilisés comme éléments de diagnostic de la qualification des matériaux. Un calcaire franc pourra être reconnu dès ce stade comme non réactif.

La pétrographie va également servir de guide au choix de l'essai de diagnostic le mieux adapté. Elle va servir enfin de base à la détermination des alcalins actifs des granulats en apportant des informations qui devraient éviter de mettre en œuvre des essais inutiles. Par exemple, une fourniture constituée pour l'essentiel de silice et de quartz, comme les matériaux de la Basse-Seine par exemple, n'a aucune raison de libérer des alcalins puisqu'ils ne contiennent qu'une faible quantité voire aucune espèce minérale incluant des alcalins dans leur réseau. On peut éviter ainsi de recourir à l'essai LPC 37 toujours contraignant, parfois délicat dans sa réalisation.

De même, si le matériau envisagé est un calcaire siliceux reconnu potentiellement réactif, la seule source d'alcalins sera à rechercher dans les quelques minéraux argileux associés.

L'apport d'alcalins au béton sera donc réduit à quelques dizaines de grammes par tonne de granulats. Aussi, sauf à réaliser le béton avec un ciment dont la teneur en alcalins et le dosage sont tels que le seuil admissible est déjà presque atteint, il ne sera pas toujours nécessaire de demander le dosage des alcalins libérables.

La démarche pétrographique doit être considérée comme un préalable à la caractérisation des granulats vis-à-vis de l'alcali-réaction. Elle n'est strictement indispensable que lorsque l'ouvrage reçoit un classement en niveau de prévention C, mais, lorsque le niveau de prévention recherché est B, vouloir s'en affranchir pour gagner du temps ou dépenser moins est à notre avis une erreur qui peut être lourde de conséquences (fig. 1).

- Si les matériaux sont NR, ils peuvent être utilisés sans restriction quel que soit le bilan des alcalins ou le type d'ouvrage. Il n'est pas nécessaire dans ce cas d'aller au-delà de cette information.

- Si les matériaux sont classés en PRP, leur utilisation dans les ouvrages de catégorie C, pour se mettre à l'abri du risque, demande que soient mises en œuvre les deux conditions prévues au chapitre 9 du document *Recommandations pour la prévention des désordres dus à l'alcali-réaction*, ou qu'une étude expérimentale mette en évidence le seuil en alcalins à partir duquel, l'alcali-réaction se montre active. Dans les autres cas, pour les ouvrages de catégorie B, le bilan des alcalins peut apparaître comme la solution la plus simple.

- Si les matériaux sont classés PR, leur utilisation est possible pour les ouvrages de niveau de prévention B mais le bilan des alcalins est déterminant, sauf à mettre en évidence la satisfaction au test de performance, mais il convient de connaître à la fois la pétrographie et les alcalins actifs. Dans le cas d'ouvrages de type C, l'étude expérimentale destinée à mettre en évidence la teneur seuil en alcalins doit être aussi complète que possible.

La nature pétrographique constitue, en l'absence de toute mesure, une indication précieuse de la teneur en alcalins totaux et par conséquent une estimation des alcalins actifs des granulats. C'est ainsi que :

- les silices, qui constituent lorsqu'ils sont abondants la catégorie PRP, ne libèrent jamais plus de 20 g/t d'alcalins actifs ;

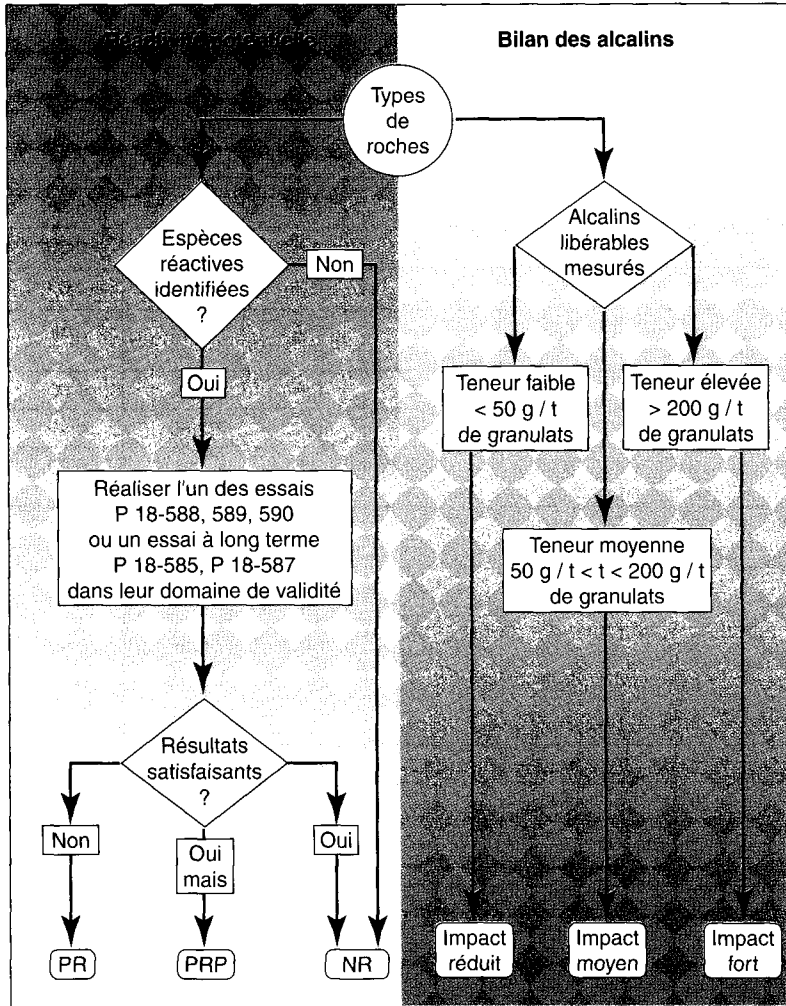


Fig. 1 - Étude pétrographique. Analyse chimique, microscopie, diffraction rayons X, Spectro IR.

- les quartzites ou certains calcaires siliceux, qui peuvent être PR ; n'ont qu'un impact réduit sur le bilan des alcalins ;
- les roches silicatées, granites, gneiss, rhyolites, micaschistes et basaltes par exemple libéreront toujours une quantité moyenne à forte d'alcalins.

Dans ce cas, il conviendra d'être prudent à la fois sur les autres constituants du béton et particulièrement en cas de mélanges granulaires NR / PR. Les mélanges NR / PRP sont toujours à proscrire. La qualification pétrographique devient déterminante dans la conception d'une formulation.

Lorsque le niveau de prévention adopté par le maître d'ouvrage est celui réservé aux ouvrages courants de génie civil, à savoir le niveau B, la démarche pétrographique *sensu stricto* n'est plus impérative. Cependant, quatre

solutions, sur six offertes par le schéma décisionnel, nécessitent à des degrés divers une connaissance préalable de la pétrographie des granulats.

Ces solutions sont :

- l'étude de la réactivité des granulats : pétrographie indispensable,
- le bilan des alcalins : pétrographie souhaitable,
- l'essai de performance : pétrographie indispensable,
- le classement des granulats en PRP : pétrographie indispensable.

Pour chacune d'elles, la pétrographie apportera une information décisive. Nous avons vu quelle est le seul moyen pour déclarer un granulats non réactif. Elle a pour mission d'informer sur la réactivité probable (pour mieux comprendre comment procède le pétrographe, il conviendra de se reporter au document *Pétrographie appliquée à l'alcali-réaction*), elle

orienté aussi vers l'essai de caractérisation le mieux adapté.

Le fascicule de documentation de l'AFNOR P 18-542 donne pour chaque essai de qualification un domaine de validité. Ce domaine dépend de la nature pétrographique des granulats.

## Bilan des alcalins

Dans la pratique, le bilan des alcalins nécessite la connaissance des alcalins du ciment. En fonction des types de ciment, ils seront pris en compte différemment.

Il convient d'y ajouter les alcalins actifs ou libérables provenant des granulats, les alcalins apportés par les adjuvants et enfin ceux provenant de l'eau ; la part déterminante revenant aux alcalins issus du ciment.

Les alcalins actifs des granulats varient d'un type de roches à l'autre. À l'intérieur d'une même catégorie de roches, les variations existent toujours mais ne sont pas déterminantes. Le tableau II donne un échantillonnage de roches sur lesquelles ont été effectuées, d'une part, les analyses totales et d'autre part, les dosages correspondant aux alcalins extractibles.

Des roches appartenant à des types pétrographiques différents, peuvent avoir des comportements différents vis-à-vis de l'alcali-réaction. Ces comportements sont reliés à la présence de silice susceptible de passer en solution et/ou à la présence d'alcalins aptes à enrichir la solution interstitielle, la rendant de ce fait plus agressive pour la silice.

Les analyses chimiques réalisées sur un éventail de roches montrent que l'on peut avoir suivant les types de roches, des différences sensibles pour la silice et les alcalins.

Ces différences sont amplifiées ou gommées au niveau des alcalins libérables ou alcalins actifs.

Dans le tableau II, les résultats correspondant aux alcalins actifs ont été obtenus après extraction selon le projet de méthode d'essai LPC n° 37.

TABLEAU II  
Analyses chimiques de roches courantes utilisées comme granulats à béton

Éléments dosés	Types de roches							
	Basalte	Granite	Rhyolite	Gneiss	Amphibolite	Calcaire siliceux	Calcaire franc	Quartzite
SiO <sub>2</sub>	51,90	71,79	69,67	75,16	46,53	22,89	0,29	96,50
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	17,83	16,17	13,80	12,60	13,39	1,28	/	0,80
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5,83	1,58	2,47	0,73	12,72	0,36	0,02	0,07
FeO	3,89	//		0,76	nd	nd	nd	nd
MnO			0,12					
MgO	4,33	0,37	0,73	0,34	8,95	0,80	1,06	0,00
CaO	7,41	0,71	2,59	0,53	6,74	40,32	53,65	0,15
Alc Tot Equ (Étude Ouali)	4,46	7,0	5,92	6,98	3,37	0,84		0,90
Alc Act Equ (Étude Ouali)	0,47	0,038	0,041	0,058	0,03	0,014		0,008
Alc Act X 100 (Ouail) Alc Tot	10,5	0,54	0,69	0,83	0,89	1,6		0,8
K <sub>2</sub> O	1,72	5,31	5,10	6,80	2,10	0,39	0,01	0,23
Alc Tot Equ (LPC)	4,54	6,52	5,50	7,02	3,67	0,42	0,036	0,35
Na <sub>2</sub> O	3,41	3,02	2,15	2,55	2,29	0,17	0,03	0,2
Alc Act Equ (LPC)	0,21	0,02	0,036	0,10	0,02	0,009	0,0014	0,0085
Alc Act X 100 (LPC) Alc Tot	4,8	0,30	0,64	1,42	0,5	2,1	3,8	1,8
TiO <sub>2</sub>	1,36	//	0,11	0,11	2,83	/	/	/
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,29	//	0,11	0,18	0,63	/	/	/
H <sub>2</sub> O	2,06	0,88	3,47	0,78	2,86	nd	0,73	0,10
SO <sub>3</sub>						*0,69	0,05	
CO <sub>2</sub>						32,88	43,70	0,41
<b>Total</b>	<b>99,03</b>	<b>99,83</b>	<b>99,78</b>	<b>100,80</b>	<b>99,11</b>	<b>99,78</b>	<b>99,54</b>	<b>98,46</b>

\* Cette valeur est à associer à la présence de pyrite

L'extraction est réalisée au moyen d'une solution saturée de chaux à ébullition pendant sept heures. Nous constatons que les alcalins actifs représentent généralement de 0,5 à 5 % des alcalins totaux. Une expérimentation réalisée pendant une durée souvent supérieure à trois cents heures, au moyen d'une solution de soude 0,7 M dans laquelle sont dosés le potassium et le silicium confirme les différences déjà notées. Une attaque symétrique est réalisée par une solution de potasse 0,7 M dans laquelle sont dosés sodium et silicium. Ces expérimentations confirment l'intérêt de l'attaque conventionnelle LPC 37, mais montrent aussi que la quantité d'alcalins extraits dépend fortement du rapport solide / solution. Dans les matériaux étudiés, si l'on excepte le basalte, qui a une phase vitreuse

importante, seul le gneiss analysé est susceptible d'enrichir sensiblement la solution en alcalins. La rhyolite est, quant à elle, presque totalement dévitrifiée ce qui explique la faible valeur des alcalins extractibles.

Les granulats, dont la teneur en alcalins totaux ne dépasse pas le pourcent, verront leur contribution à l'enrichissement en alcalins du mètre cube de béton réduite. Le plus souvent elle ne dépassera qu'exceptionnellement les 0,2 kg, ce qui est relativement faible comparé aux autres sources possibles.

La figure 2 montre la répartition des divers types de roches qui ont fait l'objet d'une étude complète, que ce soit dans le cadre de travaux de thèse (ATILH - LCPC - UPMC) ou de caractérisations des granulats en vue de la

construction d'ouvrages d'art ou de recherches sur les causes de dégradations qui affectent des ouvrages déjà construits.

La répartition des points représentatifs de chaque roche étudiée montre que les alcalins totaux peuvent aller de quelques centaines de grammes par tonne de granulats (cas des silex) à près de cent kilogrammes par tonne (cas de certains granites).

Dans notre hypothèse, nous avons considéré que l'aptitude d'une roche à libérer ses alcalins pouvait être liée à la nature des minéraux présents, à leur état d'altération et à leur accessibilité aux solutions d'attaque. Les alcalins actifs varient bien d'un type pétrographique à un autre, mais pour une même pétrographie, ils peuvent aussi varier sensiblement. Ainsi, entre gneiss et gra-

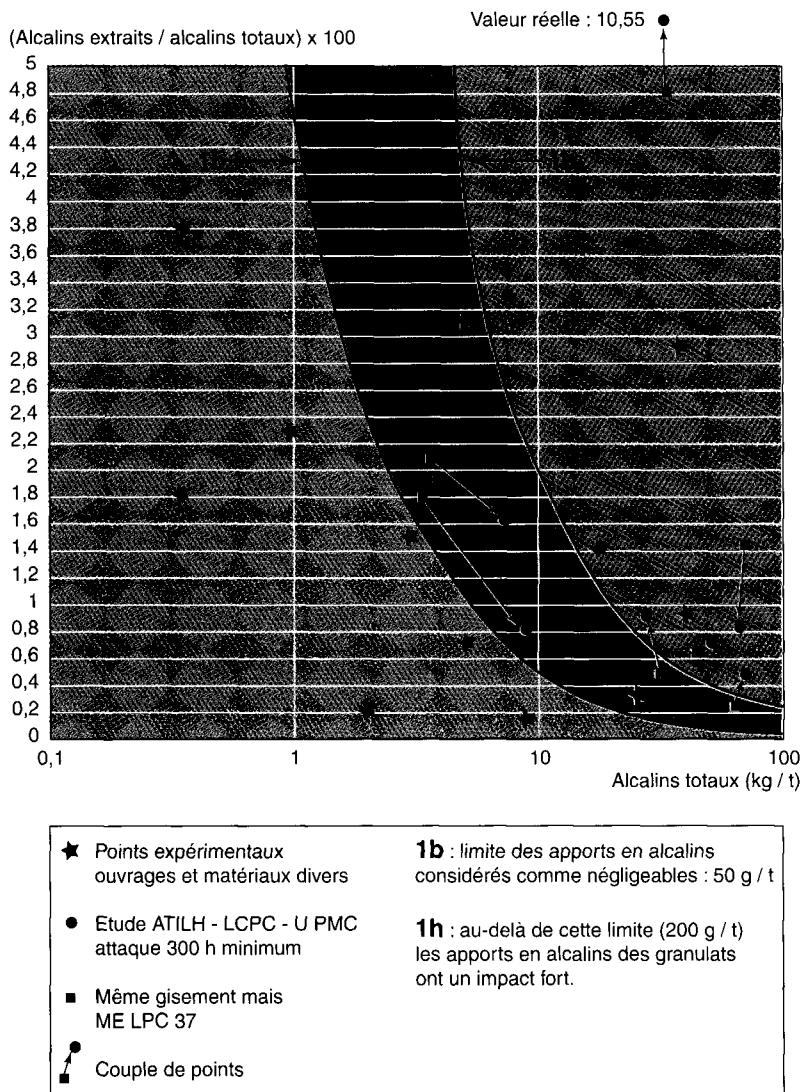


Fig. 2 - Aptitude des matériaux à libérer leurs alcalins. Les points de l'étude ATILH-UPMC ont été obtenus après une attaque poursuivie au-delà de 300 heures dans des conditions de dilution importante (Sol/Granulat = 4,2) ce qui explique la valeur élevée obtenue, en particulier avec le basalte.

nite, les alcalins totaux sont assez proches, la dimension des cristaux aussi, les minéraux dominants sont peu différents et pourtant, avec la méthode d'essai LPC 37, les alcalins actifs varient sensiblement d'une roche à l'autre. Le granite étudié apparaît comme une roche qui peut être utilisée dans le béton sans risque de voir la quantité d'alcalins s'élever trop. Le gneiss par contre apporterait au béton une quantité d'alcalins susceptible de faire basculer la formulation vers le risque alcali-réaction. L'autre méthode ne fait pas apparaître de différences aussi nettes entre les deux matériaux. Une explication

possible est fournie par la pétrographie qui montre une altération différentielle des plagioclases zonés du gneiss. Les bandes sodiques peu ou pas altérées ont conservé intact leur sodium pouvant ainsi le libérer peut être plus facilement dans la solution de chaux. On remarque aussi en étudiant le graphique, que les roches qui contiennent peu ou très peu d'alcalins totaux, même si elles les libèrent facilement ne poseront pas de problème et donc seront plus tolérantes dans le choix du ciment.

On remarque que des roches à teneur en alcalins moyenne comme

le basalte, mais riches en phase vitreuse ont tendance à libérer une forte quantité d'alcalins. Ces alcalins sont principalement contenus dans la phase vitreuse et donc facilement libérés par l'attaque alcaline. Le basalte classé NR (Non réactive) par les essais de caractérisation du risque alcali-réaction, ne réagira pas, mais si la formulation mise en œuvre même globalement classée NR, comprend un gravillon basaltique et un sable siliceux qui serait classé PR ou limite PR, il est très possible que la quantité d'alcalins de la formule devienne largement supérieure aux 3 kg/m<sup>3</sup> et que la conséquence en soit une alcali-réaction différée. Les désordres n'apparaîtront alors que tardivement, lorsque la solution interstitielle sera devenue suffisamment alcaline pour attaquer la silice des quartz et que les produits de réaction commenceront à perturber le milieu.

Le tableau III donne pour des ciments de type CPA en fonction des dosages utilisés les quantités dues au seul ciment. À partir de cette information, il sera possible d'adapter la suite de l'étude dans le cas du niveau de prévention B (le plus courant).

Il est possible de définir quatre domaines en fonction des alcalins apportés par le seul ciment ; cette approche constitue une approximation, mais elle peut être suffisante dans de nombreux cas.

➤ Moins de 2 kg/m<sup>3</sup> d'alcalins (zone verte du tableau) : aucun risque de voir le seuil limite fixé par les recommandations atteint, sauf si l'adjuvant utilisé est riche en alcalins et fortement dosé. Il semble donc possible de s'affranchir des essais de caractérisation des granulats tant d'un point de vue pétrographique que du point de vue de la libération des alcalins actifs par la méthode conventionnelle. Cependant, ce raccourci, qui peut constituer une économie importante en moyens et en temps, doit être utilisé avec précautions. Il ne s'appliquera pas dans le cas des ouvrages exceptionnels pour lesquels la connaissance des granulats, comme d'ailleurs de tous les constituants du béton, apparaît comme un préalable normal ;

➤ Entre 2 kg et 2,5 kg/m<sup>3</sup> d'alcalins (zone bleue du tableau) : le risque d'atteindre le seuil en alcalins des recommandations existe mais il doit être considéré comme faible. Dans ce cas, la démarche mise en œuvre devra s'intéresser en priorité à la connaissance des alcalins libérables par les granulats, encore appelés alcalins actifs. Si, comme le cas est fréquent, la valeur trouvée est telle que le matériau se situe loin du seuil proposé par les recommandations, alors il ne sera pas obligatoire d'aller au-delà. Dans le cas contraire, lorsque les alcalins actifs sont libérés en quantité notable et que, de ce fait, le seuil limite est presque atteint, il devient indispensable d'avoir une bonne connaissance des gra-

nulats. La pétrographie et/ou un essai normalisé de caractérisation du risque alcali-réaction sont souhaitables ;

➤ Entre 2,5 et 3,2 kg/m<sup>3</sup> d'alcalins (zone rose du tableau) apportés par le seul ciment : la prévention du risque passe obligatoirement par une étude complète des granulats. La connaissance des alcalins libérables entre autre devient très importante car de cette valeur dépendra le choix des options retenues. Encore loin du seuil limite fixé par les Recommandations, ce qui sera le cas d'un granulats n'apportant pas ou très peu d'alcalins, l'ingénieur pourra se montrer confiant, en particulier si les conditions de milieu ne sont pas trop agressives. Au contraire, il devra être extrêmement vigilant

si la valeur trouvée est telle que la limite fixée est atteinte ou presque. Dans ce cas il conviendra d'apporter une attention particulière à la qualification des granulats. Éventuellement la conformité à une autre case du schéma I des recommandations devra être recherchée (Essai de performance sur formule réelle de béton, par exemple) ;

➤ Au-delà de 3,2 kg/m<sup>3</sup> d'alcalins (zone rouge du tableau) : le souci de prévenir un risque ultérieur de désordres impose non seulement une étude complète des granulats, mais une réponse positive est presque obligatoirement nécessaire quant à la non réactivité du matériau. Si la réponse est ambiguë et qu'une solution est recherchée dans la satisfaction du test de perfor-

TABLEAU III  
Contribution des ciments à la teneur en alcalins d'un béton, calculée à partir de la teneur en alcalins du ciment exprimée en Na<sub>2</sub>O équivalent et du dosage en ciment du béton

Dosage en ciment du béton (kg/m <sup>3</sup> )	Teneur en Na <sub>2</sub> O équivalent du ciment (%)												
	0,30	0,40	0,50	0,55	0,60	0,65	0,70	0,75	0,80	0,85	0,90	0,95	1,00
180	0,54	0,72	0,90	1,0	1,1	1,2	1,3	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8
190	0,57	0,76	0,95	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9
200	0,60	0,80	1,00	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	
210	0,63	0,84	1,05	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9		
220	0,66	0,88	1,10	1,2	1,3	1,4	1,5	1,7	1,8	1,9			
230	0,69	0,92	1,15	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8				
240	0,72	0,96	1,20	1,3	1,4	1,6	1,7	1,8	1,9				
250	0,75	1,00	1,25	1,4	1,5	1,6	1,8	1,9					
260	0,78	1,04	1,30	1,4	1,6	1,7	1,8						2,6
270	0,81	1,08	1,35	1,5	1,6	1,8	1,9						2,6
280	0,84	1,12	1,40	1,5	1,7	1,8							2,6
290	0,87	1,16	1,45	1,6	1,7	1,9					2,6		2,6
300	0,90	1,20	1,50	1,7	1,8					2,6	2,6		2,6
310	0,93	1,24	1,55	1,7	1,9					2,6	2,6		2,6
320	0,96	1,28	1,60	1,8	1,9				2,6	2,6	2,6		2,6
330	0,99	1,32	1,65	1,8					2,6	2,6	2,6		2,6
340	1,02	1,36	1,70	1,9				2,6	2,6	2,6	2,6		2,6
350	1,05	1,40	1,75	1,9				2,6	2,6	2,6	2,6		2,6
360	1,08	1,44	1,80					2,6	2,6	2,6	2,6		2,6
370	1,11	1,48	1,85				2,6	2,6	2,6	2,6	2,6		2,6
380	1,14	1,52	1,90				2,6	2,6	2,6	2,6	2,6		2,6
390	1,17	1,56	1,95				2,6	2,6	2,6	2,6	2,6		2,6
400	1,20	1,60				2,6	2,6	2,6	2,6	2,6	2,6		2,6
410	1,23	1,64				2,6	2,6	2,6	2,6	2,6	2,6		2,6
420	1,26	1,68				2,6	2,6	2,6	2,6	2,6	2,6		2,6
430	1,29	1,72			2,6	2,6	2,6	2,6	2,6	2,6	2,6		2,6
440	1,32	1,76			2,6	2,6	2,6	2,6	2,6	2,6	2,6		2,6
450	1,35	1,80			2,6	2,6	2,6	2,6	2,6	2,6	2,6		2,6
460	1,38	1,84			2,6	2,6	2,6	2,6	2,6	2,6	2,6		2,6
470	1,41	1,88		2,6	2,6	2,6	2,6	2,6	2,6	2,6	2,6		2,6
480	1,44	1,92		2,6	2,6	2,6	2,6	2,6	2,6	2,6	2,6		2,6
490	1,47	1,96		2,6	2,6	2,6	2,6	2,6	2,6	2,6	2,6		2,6
500	1,50		2,6	2,6	2,6	2,6	2,6	2,6	2,6	2,6	2,6		2,6
510	1,53		2,6	2,6	2,6	2,6	2,6	2,6	2,6	2,6	2,6		2,6
520	1,56		2,6	2,6	2,6	2,6	2,6	2,6	2,6	2,6	2,6		2,6
530	1,59		2,6	2,6	2,6	2,6	2,6	2,6	2,6	2,6	2,6		2,6
540	1,62		2,6	2,6	2,6	2,6	2,6	2,6	2,6	2,6	2,6		2,6
550	1,65		2,6	2,6	2,6	2,6	2,6	2,6	2,6	2,6	2,6		2,6

mance (durée de trois ou cinq mois), la connaissance de la pétrographie est déterminante dans l'interprétation de l'essai. La mise en œuvre de l'essai de performance implique une connaissance de la pétrographie dans la mesure où la durée de l'essai est différente suivant que l'on teste des granulats dits à cinétique lente ou non, comme le demande le fascicule de documentation de l'AFNOR P 18-542. Il se peut aussi qu'un essai de ce type soit pratiqué pour suivre l'incidence des alcalins sur l'évolution du béton. Dans ce cas, la pétrographie apportera les informations indispensables au choix des paliers et à la compréhension des résultats.

Enfin, pour décider si des matériaux sont PRP ou non, il est indispensable d'effectuer un comptage et une caractérisation pétrographique préalable à tout essai de diagnostic.

## Conclusions

La connaissance des minéraux et la reconnaissance des espèces réactives apparaît comme un préalable incontournable à la qualification des granulats. Pour donner satisfaction, c'est-à-dire réduire le risque lié à l'alcali-réaction ou, mieux, le supprimer, la démarche préventive demande une certaine rigueur : elle suppose que les essais et les déterminations ne soient pas faits au hasard, mais qu'ils obéissent à la logique qui a été celle du document *Recommandations pour la prévention des désordres dus à l'alcali-réaction*.

Dans cette approche, la pétrographie occupe une place de choix, non seulement pour les ouvrages classés en catégorie C mais aussi pour la presque totalité des solutions offertes pour les ouvrages de catégorie B. Nous avons vu comment peut varier par

exemple la quantité d'alcalins libérables d'un type de roche à un autre. Cette étude a aussi mis en évidence l'aptitude de certaines roches riches en phase vitreuse à libérer progressivement leurs alcalins, contribuant ainsi à déstabiliser le milieu.

---

## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

LE ROUX A. (1991), Méthodes pétrographiques d'étude de l'alcali-réaction, *Bulletin de l'association internationale de géologie de l'ingénieur*, **44**, LCPC.

GODART B., LE ROUX A. (1995), *Alcali-réactions dans le béton : mécanismes, pathologie et prévention*, Techniques de l'ingénieur, traité de construction, C 2 252, Paris.

LE ROUX A., GODART B. (1996), *Evolution of AAR preventive measures adopted in France*, Proceedings of the 10th international conference on AAR in Concrete, Melbourne.

LE ROUX A., GUÉDON-DUBIED J.-S. (1996), *The french preventive approach to AAR compared to experience*, Proceedings of the 10th international conference on AAR in Concrete, Melbourne.

HORNAIN H. et al. (1996), *Influence of aggregates and mineral additives on the composition of pore solution*, Proceedings of the 10th international conference on AAR in Concrete, Melbourne.

GOGUEL R. (1996), *Selective dissolution techniques in AAR investigation : application to an exemple of failed concrete*, Proceedings of the 10th international conference on AAR in Concrete, Melbourne.

GUÉDON-DUBIED J.-S., LE ROUX A. (1994), *Influence of microcracking on the onset and development of the Alkali silica reaction*, 3e Conférence Internationale, CANMET/ACI, Nice.

CORNEILLE A., BOLLOTTE B. (1994), *Results of round robin test*

*program for the validation of the test methods in the french recommendations for the prevention of AAR damage to concrete*, 3e Conférence Internationale, CANMET/ACI, Nice.

AFNOR - Norme P 18-541 (1994), *Granulats naturels pour bétons hydrauliques*.

AFNOR - Norme P 18-542 (1994), Fascicule de documentation, *Granulats naturels courants pour bétons hydrauliques*.

AFNOR - Norme P 18-585 (1990), *Stabilité dimensionnelle en milieu alcalin - essai sur mortier*.

AFNOR - Norme P 18-587 (1990), *Granulats : Stabilité dimensionnelle en milieu alcalin - essai sur béton*.

AFNOR - Norme P 18-588 (1991), *Granulats : Stabilité dimensionnelle en milieu alcalin - essai sur béton*.

AFNOR - Norme P 18-589 (1992), *Granulats : test cinétique : réactivité potentielle de type alcali-silice et alcali-silicate*.

AFNOR - Norme P 18-590 (1994), *Granulats : stabilité dimensionnelle en milieu alcalin : essai accéléré sur mortier par autoclavage*.

ASTM - Standard Test Method C 441 (1981) : *Efficacité des additions minérales pour la prévention de gonflement excessif des bétons provoqués par l'alcali-réaction*.

LCPC - Projet de Méthode d'essai 37 (1993), *Essai de granulats - Détermination des alcalins solubles dans l'eau de chaux*.

LCPC - Projet de Méthode d'essai 44 (1997), *Alcali-réaction du béton Essai d'expansion résiduelle sur béton durci*.

LCPC (1994), *Recommandations pour la prévention des désordres dus à l'alcali-réaction*.

LCPC (1994), *Guide pour l'élaboration du Dossier Carrière*.

SETRA (1996), *Guide pour la rédaction des pièces écrites de DCE*.