

Compte rendu de la XI^e Conférence internationale sur les réactions alcalis-granulats dans le béton

11-16 juin 2000, Québec (Canada)

Éric BOURDAROT

Centre d'Ingénierie hydraulique
EDF Pôle Industrie

Catherine LARIVE

Docteur de l'École Nationale des Ponts et Chaussées
Ingénieur des Travaux publics de l'État
Animateur du pôle Matériaux, structures et vie de l'ouvrage
Génie civil
Centre d'Études des Tunnels

Jeanne-Sylvine GUÉDON-DUBIED

Docteur de l'École Nationale des Ponts et Chaussées
Ingénieur des Travaux publics de l'État
Chef de la section Géologie, mécanique des roches et géotechnique de l'environnement (p.i)
Division Mécanique des sols et des roches et géologie de l'ingénieur

KeFei LI

Docteur de l'Université Tongji (Shangai)
Doctorant de l'École Nationale des Ponts et Chaussées
Section Modélisation mécanique
Service Modélisation pour l'ingénieur
Laboratoire Central des Ponts et Chaussées

Contexte de la conférence

La XI^e Conférence internationale sur les réactions alcalis-granulats dans le béton fait suite à la conférence organisée à Melbourne en 1996. Le principal support logistique dans l'organisation de cette conférence a été fourni par l'université de Laval au côté du ministère des Transports du Québec et d'Hydro-Québec.

Les conférences de cette filière (Comité international sur les réactions alcalis-granulats) sont organisées depuis le milieu des années 1970 : au commencement tous les deux ans, puis tous les trois ans, puis actuellement tous les quatre ans. La prochaine conférence internationale sera organisée à Pékin en 2004. Notons qu'une autre filière de congrès, spécialisés dans les ouvrages hydro-électriques, s'est développée et concrétisée par l'organisation de deux conférences à Fredericton (Canada) 1992 et à Chattanooga (États-Unis) en 1995.

Près de 250 personnes ont pris part à cette conférence. La liste des inscrits fait apparaître la participation suivante par pays :

- > Canada : 79 participants dont 47 en provenance du Québec (et notamment 15 participants d'Hydro-Québec) ;
- > États-Unis (36), Japon (21), France (21), Royaume-Uni (11), Belgique

(10), Norvège (7), Pays Bas (5), Brésil (5), Allemagne (4), Suisse (4), Côte d'Ivoire (4), Afrique du Sud (4), Italie (3), Chine (3), Australie (3), Islande (2), Slovénie (2) ;

> la Nouvelle-Zélande, Taiwan, l'Irlande, l'Argentine, la République Tchèque, le Portugal et la Suède avaient chacun un participant.

Ce congrès s'est déroulé sur cinq jours. Le programme final incluait au total 131 présentations orales sur un total de 142 contributions écrites par quelques 300 auteurs et co-auteurs. L'objectif du



congrès était de discuter des développements les plus récents sur les réactions alcalis-granulats dans le béton (on notera au passage que le terme français d'alcali-réaction plaît assez peu à la communauté scientifique qui juge anormal d'occulter le rôle joué par les granulats dans cette pathologie...). Il comportait plusieurs sessions, deux symposiums, une table ronde sur les spécifications, des ateliers et des visites techniques.

■ Une visite technique dans la région de Québec, le mercredi 14 juin après-midi, a permis d'examiner trois ouvrages affectés par l'alcali-réaction :

> le viaduc du Vallon-Charest, ouvrage comportant une structure porteuse de poutres en béton armé assemblées en treillis présentant de sérieux signes de dégradations extérieures, sans que l'exploitation de l'ouvrage n'en soit pour l'instant affectée. Les études de diagnostic et les solutions de réhabilitation sont en cours d'élaboration (fig. 1) ;

> la tranchée couverte Samson dont les murs de soutènement des voies d'accès présentent des phénomènes de fissuration ; différents traitements des parements ont été mis en œuvre (silanes, reconstitution du parement, etc.) et semblent en avoir stabilisé l'évolution (fig. 2) ;

> les massifs d'appui des pylônes d'une ligne à haute tension d'Hydro-Québec. Une démolition partielle des massifs avec reconstitution d'un chemisage armé a permis de réhabiliter l'ouvrage sans entraîner de coupure de l'alimentation électrique (fig. 3).

Cette visite a permis de constater que les désordres observés sur les ouvrages canadiens ont une intensité et une fréquence bien supérieures à ce que l'on

Fig. 1 - Le viaduc du Vallon-Charest.



Note

technique



Fig. 2 - Mur de la tranchée couverte Samson.

peut rencontrer en France. Comme chez nous, les capacités portantes sont proportionnellement peu affectées par rapport à l'étendue visuelle des désordres.

■ **Trois ateliers** ont également été organisés le jeudi 15 juin après-midi sur les thèmes suivants :

- spécifications sur les essais de réactivité et mesures préventives,
- pétrographie des granulats réactifs,
- auscultation et modélisation des structures en béton.

Dans ce dernier atelier, où Eric Bourdarot avait été convié pour présenter le point de vue du maître d'ouvrage et Catherine Larive pour exposer celui des modélisateurs, l'accent a été particulièrement mis sur la complémentarité des deux disciplines auscultation et modélisation. Les différents types de modèles de comportement disponibles et mis en œuvre dans des modélisations d'ouvrages ont été rappelés ainsi que les limites de leur utilisation. Il apparaît que, quel-



Fig. 3 - Massif d'appui d'un pylône d'une ligne à haute tension d'Hydro-Québec.

les que soient les méthodes d'investigation utilisées, la mise en œuvre d'une auscultation sur le long terme reste indispensable.

■ Le nombre d'exposés a obligé les organisateurs à répartir les présentations dans **deux sessions parallèles**. Le présent compte-rendu n'a pas pour objet d'aborder l'ensemble des sujets traités (les actes de la conférence comptent plus de 1 300 pages) mais de présenter les principales tendances qui s'en dégagent.

Examen des sujets traités

Mécanismes

Les différents mécanismes chimiques impliqués dans les réactions alcalis-granulats ne font pas encore l'objet d'un véritable consensus dans la communauté scientifique. Cette conférence n'a pas permis sur ce point d'avancée décisive, certains exposés contribuant même à remettre en cause des hypothèses émises précédemment sans réellement faire progresser la compréhension globale des mécanismes.

La forte complexité des phénomènes en jeu, mais également une certaine dispersion des moyens et le défaut d'une véritable approche théorique des problèmes, apparaissent comme les principales raisons de cette difficile progression. De ce point de vue, les travaux effectués par les équipes françaises apparaissent comme novateurs, par exemple ceux réalisés par l'université d'Orsay (équipe Perruchot, Massard) en collaboration avec le LCPC (équipe Larive, Godart, Coussy) à partir de gels synthétiques afin de déterminer la stoechiométrie des gels et l'avancement des réactions conduisant à leur formation.

Le rôle du calcium dans la formation des gels est toujours un actif sujet de discussion, S. Diamond montrant que les proportions du calcium contenu dans les gels sont extrêmement variables au sein d'un même béton.

Catherine Larive, dans un exposé consacré aux effets de l'eau, a montré à partir des résultats obtenus lors de ses travaux de thèse, que l'eau ne joue pas dans le phénomène de gonflement de rôle du type mécanisme d'imbibition ou pression osmotique. En effet, les quantités d'eau absorbées par des bétons réactifs ou non réactifs sont semblables et un apport d'eau après formation des produits de réaction ne conduit pas à de nouveaux gonflements significatifs. Par contre, la quantité d'eau fournie à un

béton réactif conditionne les valeurs d'expansion obtenues. Il faut noter également le caractère irréversible de l'action de l'eau : un béton initialement privé d'eau dans sa période active de gonflement présente un gonflement asymptotique inférieur à celui d'un béton non privé d'eau.

Facteurs influençant la réactivité

Une part des exposés a été consacrée au facteur essentiel que constituent les alcalins. À l'aide de tests d'extraction à l'eau chaude faits sur des bétons carotés dans des barrages d'Hydro-Québec, M.A. Bérubé a montré que la quantité d'alcalins extraite d'un béton en place pouvait être significativement supérieure à celle apportée par le ciment, les alcalins supplémentaires étant fournis par les granulats. Ces résultats confirment des observations faites sur le barrage du Chambon. On notera qu'un lessivage des alcalins se produisant en surface des structures, il est conseillé de procéder à des prélèvements à au moins 0,5 m de profondeur.

D.W. Hobbs (British Cement Association) précise qu'un taux de 2,5 à 3,5 kg de Na_2O équivalent/ m^3 de béton est bien adapté aux agrégats rencontrés en Grande-Bretagne mais qu'une température de 38 °C pour un test de réactivité de douze mois sur éprouvettes de béton peut être considérée comme insuffisante.

Plusieurs exposés ont été consacrés à l'action des solutions de NaCl en présence de l'alcali-réaction. Les résultats présentés par M.A. Bérubé n'ont pas permis de mettre en évidence une amplification des alcalis-réactions par l'action du NaCl. Cela peut être dû à la faible pénétration des ions Na^+ et Cl^- et à la décroissance observée du pH. À terme cependant, une augmentation du gonflement pourrait être observée en relation avec la formation de chloro-aluminates.

A contrario, un article de l'université japonaise d'Ishikawa montre une augmentation des gonflements de mortiers réactifs plongés dans une solution de NaCl, mais il met également l'accent sur la modification des conditions de solubilisation des sulfates en présence de NaCl et sur le rôle que pourrait jouer la formation d'ettringite dans le gonflement. Dans un autre article de la même université, le rôle du NaCl est précisé : il est, en particulier, confirmé que la réaction du NaCl avec les C_3A peut aboutir à la formation de chloro-aluminates accompagnée par la libération d'ions OH^- et une augmentation du pH.

A. Shayan (Australie) présente les résultats d'un programme expérimental sur les effets de la protection cathodique sur le développement des réactions alcalis-granulats. Sa conclusion est que, pour les intensités de courant généralement utilisées, celle-ci ne doit pas avoir de conséquence mais que les risques augmentent pour des intensités élevées.

B. Durand (Hydro-Québec) a attiré l'attention sur l'effet des mélanges entre granulats qui, individuellement, peuvent apparaître peu réactifs mais dont la réactivité peut être amplifiée par les effets du mélange. Il s'agit, notamment, du cas où la fraction fine des granulats peut apporter une quantité d'alcalins notable.

Essais

Les présentations concernant les procédures expérimentales à mettre en œuvre, tant pour la qualification de nouveaux bétons que pour l'évaluation de la réactivité de bétons d'ouvrages affectés, ont occupé une place importante dans les travaux. Trente-deux articles ont été publiés sur ce thème et il est d'ailleurs dommage que la simultanéité des sessions n'ait pas permis d'assister à l'ensemble des présentations. Une synthèse rapide de ces articles montre qu'une certaine dispersion demeure dans les procédures expérimentales ; du travail est encore nécessaire avant d'aboutir à des tests acceptés universellement. C'est à cette tâche que travaille le Comité technique 106 de la RILEM.

Les difficultés de convergence sont essentiellement dues à la nécessité d'accélérer les tests en augmentant les dosages en alcalins, la température, l'humidité, ou parfois en faisant les trois en même temps. Un souci de miniaturisation conduit également à travailler sur des matériaux parfois concassés ou écrêtés qui ne représentent pas toujours les matériaux utilisés pour les ouvrages, en particulier pour les barrages.

Il faut noter également que le choix des tests doit dépendre fortement de la nature des agrégats testés.

De nombreux types d'essais correspondant à différentes normes nationales ou internationales existent : normes américaines (ASTM), canadiennes (CSA), françaises (NF), recommandations RILEM. Les tests des normes ASTM sont les plus souvent utilisés et les plus discutés et servent de base de comparaison aux autres tests.

Une fois de plus, il est regrettable de constater que les discussions sur les

méthodes d'essais représentent toujours la plus importante des sessions. Des essais dont l'inefficacité a été maintes fois démontrée sont encore largement cités (e.g. ASTM C227 « barres de mortier » et ASTM C289 « essai chimique »). On se félicitera toutefois de voir que l'essai de performance à 60 °C proposé par la France dans le cadre de la RILEM est maintenant également employé par les Canadiens (Lafarge Granulats).

On notera également que la pétrographie est universellement reconnue comme l'étude préliminaire indispensable aux essais accélérés mais que les pétrographes spécialisés en alcali-réaction sont malheureusement peu nombreux. La seule identification des granulats par familles pétrographiques est largement insuffisante, des roches de même famille pouvant avoir des réactivités très différentes. Les problèmes demeurent donc quant aux moyens pour parvenir à une bonne détermination de la réactivité des roches avec toujours les problèmes d'échantillonnage, de représentativité par rapport à un stock et de suivi dans le temps de la production.

La constitution de listes séparant les roches réactives (PR) et non réactives (NR) est insatisfaisante et même dangereuse du fait des géologies variées entre les différents pays et continents. Certaines roches portant le même nom (nom donné par un pétrographe averti) peuvent se révéler NR ou PR en fonction de leur histoire géologique parfois longue, et l'équivalence entre un nom de roche et une réactivité est un raccourci dangereux. Le diagnostic de la réactivité d'un granulat doit vraiment être le résultat d'un diagnostic pétrographique ET d'un essai de comportement en milieu alcalin ; cette démarche est menée fructueusement dans de nombreux pays.

Rappelons l'action très motrice du Comité RILEM TC106, qui s'est réuni la veille du congrès et qui cherche à faire progresser la normalisation, en particulier auprès de la Communauté Européenne pour les trois principaux tests :

- > TC-106-1 : examen pétrographique,
- > TC-106-2 : essais ultra-accélérés barreau de mortier (dérivé de l'essai « sud-africain »),
- > TC-106-3 : essai sur béton (qui s'inspire largement de l'essai de performance français).

D'autres tests sont également développés comme le test australien QMR (Queensland Mains Road accelerated test procedure) qui semble montrer de bonnes corrélations avec les observa-

tions faites sur ouvrages. On note aux États-Unis le développement de procédures hors ASTM, comme au Kansas le KDOT (wetting and drying test method) fait sur de petites poutres soumis à des cycles d'humidification-sèchage pendant un an. Il existe également une standardisation en Chine (CECS).

Les principaux développements dans les articles tournent autour des deux principaux tests reconnus :

- > le test accéléré sur mortier AMBT (Accelerated Mortar Bar Test) qui correspond au test ASTM C 1260 ;
- > le test sur prisme de béton CPT (Concrete Prism Test) qui correspond au test ASTM C 1293.

Ces deux tests se retrouvent dans toutes les différentes normes standard avec des procédures d'essais variables.

L'intérêt du premier test est sa rapidité (quatorze jours) mais il apparaît globalement moins fiable que le second. Plusieurs articles ont pour objectif de préciser le domaine de validité de l'AMBT. Il apparaît ainsi (cf. articles de Lafarge Canada) que cette validité est fonction des types de roches considérées, la fiabilité semblant meilleure sur les roches sédimentaires que sur les roches métamorphiques ou ignées. Les cinétiques lentes de certaines formes de silice peuvent expliquer les effets de retard sur le test AMBT. Une bonne connaissance des seuils de gonflement pour chacune des roches par comparaison entre les résultats des deux types de test permet un « étalonnage » du test AMBT.

Un consensus semble se dégager pour considérer le test AMBT comme un test de criblage mais une bonne pratique est de confirmer ce test par un essai sur prisme de béton (CPT).

Plusieurs articles traitent de la comparaison entre les résultats des essais en laboratoire et des constatations faites sur ouvrages.

Les enjeux économiques de ces procédures d'essais apparaissent importants tant pour ce qui concerne la fiabilité à long terme des structures construites, que le coût et les délais des procédures d'essais et d'agrément pour les carrières et les cimentiers.

Mesures préventives

Le sujet principal de cette partie de la conférence a été consacré à l'effet inhibiteur des différentes additions minérales sur les réactions alcalis-granulats.

Un consensus se dégage dans les différents articles sur l'intérêt de telles addi-

tions, dont les plus efficaces sont les fumées de silice, les cendres volantes, les laitiers et les pouzzolanes. On note aussi l'intérêt des additions de schistes ou d'argiles (kaolinite, zéolite, etc.) après calcination. Le pouvoir inhibiteur de ces différentes additions est principalement lié à la réduction des quantités de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ et à la réduction du pH. Sont évoquées également la réduction de la porosité et la diminution de la mobilité des alcalins.

Plusieurs articles présentent les résultats de programmes expérimentaux qui testent les pourcentages d'ajouts nécessaires. Les proportions minimales exprimées en pourcentage de la masse totale des matériaux cimentaires fournies par les différents auteurs sont en général voisines de 10 % pour la fumée de silice, 20 % pour les cendres volantes et 30 % pour les laitiers.

Les ajouts pouzzolaniques sont de plus en plus utilisés pour prévenir les gonflements lors de l'utilisation de granulats réactifs, pourtant aucun essai n'est considéré comme vraiment fiable pour tester leur efficacité (il faudrait au moins augmenter la durée des essais). L'essai « sud-africain » est souvent utilisé dans ce but car il est particulièrement accéléré et agressif. Le danger potentiel des fumées de silice mal dispersées a été une nouvelle fois mis en évidence.

Plusieurs articles évoquent l'action des sels de lithium, mais leur utilisation en tant qu'ajouts semble selon plusieurs auteurs d'un moindre intérêt par rapport aux ajouts précédents.

Il faut noter deux articles très intéressants concernant l'effet inhibiteur des poudres de verre recyclé. Il apparaît en effet que si le verre, sous forme de granulés, peut s'avérer très réactif en raison du caractère amorphe de la silice, il présente, sous forme de poudre, un effet pouzzolanique bénéfique en cas de réactions alcalis-granulats.

Un article montre également la possibilité de limiter les gonflements des bétons réactifs en y incorporant des agrégats de faible densité pouvant servir de vase d'expansion aux matériaux gonflants, comme peut le faire un béton à forte porosité. Toutefois, cette solution ne peut vraisemblablement que limiter les gonflements et non les éviter puisque les ajouts d'air entraîné n'y parviennent pas.

Diagnostic, pronostic

Dans cette partie, les méthodes et outils spécifiques de diagnostic et de pronostic

ainsi que des cas particuliers de structures affectées ont été présentés.

Des méthodes basées sur la mise au point d'indicateurs de dégradation des structures ont en particulier été développées ou améliorées. Ces méthodes ne doivent toutefois pas être considérées comme quantitatives ; ce sont des indications à utiliser avec prudence en veillant en particulier à la représentativité et au nombre d'échantillons traités.

Ainsi, une nouvelle version du test DARAG proposé par le Centre d'études du bâtiment et des travaux publics (CEBTP) a été présentée. Une modification du calcul des critères K1 et K2 permet d'accorder plus d'importance au nombre de sites affectés par rapport à l'intensité des réactions. Il faut, en effet, noter que les poussées et donc les dégâts engendrés par les gels paraissent être davantage fonction du nombre de sites touchés que du degré d'avancement des réactions ou du degré de cristallisation des produits de réaction.

Deux articles présentent une application de la méthode DRI (Damage Rating Index) proposée en 1995 par Dunbar et Grattan-Bellew sur des principes semblables à ceux du DARAG. En particulier, l'article de P. Rivard et *al.* présente la mise en œuvre de la méthode grâce au développement d'une technique de traitement d'images. Le degré d'endommagement de la structure est ainsi évalué à partir d'échantillons de béton faisant l'objet d'une analyse pétrographique. La détermination des surfaces des différentes zones de gels, du degré de dégradation de ces zones, des densités et des dimensions des fissures permet le calcul de l'index DRI. L'application de la méthode au barrage de Beauharnois montre une bonne corrélation avec les résultats des mesures *in situ*.

Un autre test développé au Japon, basé sur une analyse des concentrations en ions OH^- et une mesure des expansions résiduelles sur carottes, semble également être une manière intéressante d'évaluer la progression des réactions dans les structures.

Au-delà de la connaissance de leur état actuel, l'appréciation du potentiel résiduel de gonflement des structures affectées reste au centre des préoccupations. M.A. Bérubé et *al.* proposent ainsi le calcul de l'indicateur PRE (Potential Rate of Expansion) qui tient compte des différents facteurs : expansion résiduelle mesurée en laboratoire, réactivité des granulats, taux d'alcalins solubles mais également environnement des bétons dans l'ouvrage (humidité, tem-

pérature, niveau de confinement). Cette méthode est en cours d'application sur les ouvrages d'Hydro-Québec.

Pour ce qui concerne les exemples de diagnostic et de pronostic appliqués aux ouvrages, un cas de réaction alcali-granulats attribué à l'action de rayonnements ionisants a été présenté par Escadillas du LMDC de l'Institut national des sciences appliquées (INSA) de Toulouse. Ce cas, survenu au centre anti-cancéreux du centre hospitalier de Toulouse, affecte un mur soumis à l'action des rayons (l'autre côté du mur, non soumis à l'action des rayons, ne présentant pas ce type de désordre). En même temps que la formation des gels silico-alcalins, sont observées les décompositions des agrégats d'hématite en goethite et limonite gonflantes. À la fin de leur article, les auteurs attirent l'attention sur l'exposition éventuelle à ce type de dégradation des containers en béton employés pour le stockage des déchets radioactifs.

Un autre cas intéressant de réaction alcali-granulats a été présenté par Escadillas, celui d'un mortier de réparation de façade dans la région toulousaine contenant des fumées de silice. Cette réaction est attribuée à la présence de boulettes de silice mal dispersées en raison de la technique de mélange employée.

Modélisation, essais sur mini-structures

Dans le domaine de la modélisation, les contributions sont essentiellement venues de France avec :

- > une contribution du LCPC : modèle développé par Catherine Larive, implanté dans CÉSAR par KeFei Li dans le cadre d'un travail de thèse. Ce modèle pour l'ingénieur repose sur une approche globale et volontairement simplifiée. Il comprend cinq paramètres en plus des paramètres élastiques ;
- > deux contributions EDF-université de Marne-la-Vallée présentées par B. Capra (Marne), l'une relative à la présentation du modèle à échelle micro (modélisation des mécanismes élémentaires), l'autre à celle du modèle à échelle macro (modèle de comportement pour la modélisation des structures).

Deux autres modèles ont été proposés, l'un par l'université de Hong Kong, basé sur le modèle d'endommagement de Mazars, l'autre dans le cadre d'une collaboration entre l'université de Thrace et celle de Toronto.

Du point de vue de la modélisation structurelle d'ouvrages atteints d'alcali-

réaction, trois éléments fournissent de nouvelles visions en matière de modélisation mécanique du gonflement.

❶ La température et l'humidité interne du béton sont identifiées comme les facteurs cruciaux pour l'avancement de l'alcali-réaction. D'après Catherine Larive, l'hétérogénéité du gonflement peut être attribuée à la distribution hétérogène de granulats réactifs au sein du matériau béton. D'après B. Capra, ce gonflement hétérogène peut être décrit par une distribution aléatoire de granulats réactifs à l'aide d'une méthode probabiliste.

❷ Il est possible de décrire les lois d'endommagement d'un béton atteint d'alcali-réaction en intégrant directement l'influence du gonflement interne du béton sur ses caractéristiques mécaniques (H.X. Wen et *al.*). Pour cela, les théories de l'endommagement sont employées pour rendre compte du couplage qui peut exister entre le gonflement et la dégradation du matériau, et notamment sa fissuration.

❸ L'influence de l'avancement de l'alcali-réaction sur le comportement en flexion de poutres en béton armé est appréhendée en comparant leur comportement sous des conditions variées comme l'absence de chargement, un chargement statique ou un chargement dynamique (L. Monette et *al.*). À partir des relations contrainte-déformation du béton où le module d'Young sécant est paramétré par la valeur du gonflement, il est possible d'étudier l'équilibre existant entre les contraintes internes du béton et celles des barres d'acier afin de modéliser le comportement en flexion des poutres (S.J. Pantazopoulou et *al.*).

Catherine Larive, dans un exposé reprenant les résultats de ses travaux de thèse, a montré que l'anisotropie des gonflements observés sur certaines éprouvettes (gonflements verticaux deux fois supérieurs aux gonflements horizontaux) pouvait s'expliquer par l'anisotropie intrinsèque du béton, liée à la vibration qui entraîne la formation d'un ménisque d'eau en face inférieure des agrégats en particulier lorsque ceux-ci ont une forme allongée. Cette anisotropie contribue (avec l'hétérogénéité) à expliquer la dispersion des résultats observée lors des essais sur ouvrages à partir de carottes qui peuvent être dans certains cas forcés verticalement et, dans d'autres, horizontalement.

En outre, plusieurs programmes d'essais ont été présentés :

➤ un programme expérimental engagé par l'université de Sherbrooke (équipe de G. Balivy) pour évaluer les effets de

renforcements et du confinement sur les réactions alcalis-granulats (une collaboration avec cette équipe pourrait s'avérer intéressante) ;

➤ le programme expérimental sur poutres développé à l'université d'Ottawa montrant que la résistance à la compression n'est pas significativement affectée par les réactions alcalis-granulats alors que les autres paramètres de résistance (flexion, traction) et surtout la rigidité le sont ;

➤ à partir des résultats d'un programme expérimental sur prismes de mortiers autoclavés, J.-L. Gallias, de l'université de Cergy-Pontoise, montre que la résistance à la compression est peu affectée par les réactions alcalis-granulats alors que le module dynamique d'élasticité et la résistance à la flexion le sont. D'autres études montrent cependant que les propriétés de résistance des bétons diminuent plus rapidement lorsque le gonflement augmente. J.-L. Gallias avance l'hypothèse que les gels qui induisent la fissuration peuvent également jouer un rôle cohésif plus ou moins important dans les fissures ;

➤ à partir de carottes prélevées sur différents ponts aux Pays-Bas, T. Siemes et J. Visser de l'université de Delft montrent que la résistance à la traction obtenue sur essais en traction directe est beaucoup plus affectée que celle obtenue par essai par fendage. Ce comportement différent du béton, au cours de ces deux types d'essais, est attribué par les auteurs au rôle joué par les points faibles des liaisons pâte-granulats, ce qui est conforme aux explications de Catherine Larive sur l'origine de l'anisotropie ;

➤ le programme expérimental sur mini-structures engagé en collaboration entre le LCPC et EDF a été présenté par EDF (Eric Bourdarot). Le principe d'une diffusion à terme des résultats de ces travaux et d'une mise en commun plus large des résultats de programmes d'essais sur mini-structures a semblé intéresser plusieurs participants.

Symposium sur les réactions alcalis-granulats dans les structures routières et les chaussées

Ce symposium s'est déroulé en parallèle avec le symposium sur les barrages et les centrales hydrauliques. Quinze articles ont été rédigés sur ce thème.

L'analyse des articles publiés permet de constater que les alcalis-réactions concernent de nombreux pays et que les cas sont progressivement révélés à mesure que l'auscultation et l'analyse des

structures dégradées progressent. Sont ainsi touchés les ponts (piles et tabliers), les chaussées et les murs de soutènements.

Des méthodes de confortement sont mises en œuvre avec quelques succès, en particulier l'étanchement. Ainsi un article de la SANEF (Société des autoroutes du Nord et de l'Est de la France) indique que sur un parc de 224 ponts, neuf sont affectés et sept demandent une auscultation et des réparations. Il s'agit essentiellement de travaux d'étanchement et de mise en place d'un revêtement hydrophobe à base de silanes. Un ralentissement du gonflement des structures est constaté à la suite de ces travaux.

Un chemisage précontraint des piles du pont de Toyokawa a été réalisé, afin de confiner le béton, refermer le réseau de fissures et limiter les gonflements. Cette technique s'apparente à celle employée pour les travaux de réhabilitation des massifs de fondation des pylônes de la ligne à haute tension d'Hydro-Québec (visités au cours de cette conférence).

Dans deux cas (pont et mur de soutènement), des travaux plus lourds avec démolition totale ou partielle ont été effectués.

La recherche de méthodes et de techniques d'inspection adaptées au nombre d'ouvrages et à leurs caractéristiques est un important sujet de préoccupation. Les méthodes non destructives de contrôle trouvent ici un bon domaine d'application.

Symposium sur les réactions alcalis-granulats dans les barrages et les centrales hydrauliques

Une quinzaine de présentations ont été faites sur ce thème. Différents cas d'ouvrages : barrages-poids ou barrages-voûtes, centrales hydro-électriques, prises d'eau, écluses, ont ainsi été présentés. Certains ouvrages sont maintenant bien connus et ont fait l'objet, depuis une dizaine d'années, d'exposés dans d'autres congrès. Il s'agit, notamment, des ouvrages de Mactaquac (Canada) et Apolonio Sales (Moxoto, Brésil). Le suivi des résultats obtenus à la suite des différentes méthodes confortatives adoptées et les orientations ou les modifications d'orientations adoptées apportent beaucoup d'informations pour les ouvrages gérés par EDF ou pour ceux qu'EDF étudie pour des tiers.

■ Ainsi sur **Moxoto**, il apparaît que l'opération de sciage réalisée entre

1988 et 1992 (trois sciages réalisés entre les trois groupes), même si elle a permis d'améliorer de manière transitoire le fonctionnement des groupes, n'est pas suffisante en elle-même et qu'une opération lourde sur les groupes avec mise en place de degrés de liberté et de réglage a été nécessaire.

■ À **Mactaquac**, des opérations très lourdes ont été réalisées sur le génie civil : sciage entre groupes et aux extrémités, sciage des conduites d'aménage au droit de l'usine. Mais, en parallèle à ces interventions sur le génie civil, il faut noter que des travaux de réhabilitation très importants ont également été réalisés sur les groupes avec mise en place de possibilité de réglage au droit des liaisons avec le génie civil.

Il faut noter que, quelles que soient les solutions adoptées, des études de comportement aux éléments finis sont menées afin de comprendre le comportement global de la structure et servir de guide aux différentes actions menées. Les modèles utilisés sont le plus souvent des modèles élastiques-linéaires, avec, dans de rares cas, une certaine prise en compte de l'influence des contraintes.

Pour ce qui concerne les barrages proprement dits, il faut noter la synthèse faite par D. Curtis d'Acres, relative aux barrages-voûtes atteints par la réaction alcali-granulats, à partir des actes de la conférence de Chattanooga.

Il faut noter également le point de vue défendu par M. V. Gocevski d'Hydro-Québec qui montre que les choix faits en faveur de méthodes confortatives des structures (sciage ou mise en place de tirants précontraints), en particulier dans les usines hydroélectriques, sont souvent très contestables et basés sur des raisonnements mécaniques erronés ou approximatifs. M. V. Gocevski pense que ces travaux ne règlent pas les problèmes à long terme et que, le plus souvent, des interventions sur le matériel électromécanique sont suffisantes pour assurer la poursuite de l'exploitation des ouvrages.

Pour ce qui concerne la répartition des ouvrages concernés, il faut noter l'importance du problème au Brésil. Un exposé du Comité brésilien des grands barrages met en évidence une vingtaine d'ouvrages atteints à des degrés divers.

En particulier, les ouvrages du complexe hydroélectrique Paulo Afonso, dont fait partie Moxoto, sont affectés.

Un problème particulier est posé aux exploitants de la voie fluviale du Saint-Laurent, dont plusieurs écluses gonflent. Les études réalisées à la suite des différents incidents observés sur les organes mécaniques n'ont pas encore permis de décider des actions confortatives à mener.

Il faut noter, au cours de cette conférence, l'absence de représentants des bureaux américains (USBR, USACE, TVA, FERC), très actifs à Chattanooga mais dont l'activité dans ce domaine semblerait s'être ralentie.

Moyens curatifs

Les moyens curatifs permettant d'influer sur les réactions elles-mêmes n'ont pas véritablement fait leurs preuves, en particulier pour les structures massives, mais un ralentissement des réactions semble possible pour les ponts (cf. § « Symposium sur les réactions alcalis-granulats dans les structures routières et les chaussées »). Des exemples de traitement de structures peu épaisses, comme des tabliers de ponts, à l'aide d'ions lithium ont été présentés. Ce procédé n'est pas envisageable actuellement pour les structures massives : nécessité de faire circuler des courants électriques, volume d'ions à mettre en œuvre, pollution des eaux.

La mise en place de revêtements hydrophobes à base de silanes est également tentée avec un certain succès sur les structures minces. Sur les structures peu épaisses, une imperméabilisation des surfaces semble actuellement la solution la plus couramment retenue. Dans le cas des structures épaisses comme les barrages, les effets d'une imperméabilisation du parement amont ne sont pas encore démontrés, compte tenu des quantités d'eau disponibles à l'intérieur des ouvrages.

Conclusions

Cette XI^e Conférence internationale sur les réactions alcalis-granulats (CIRAG) s'est avérée, comme les précédentes,

être un rendez-vous important pour les scientifiques et les industriels concernés par les réactions alcalis-granulats. Les actes de cette conférence, par leur richesse, constituent un ouvrage de référence permettant de faire le point sur les connaissances actuelles dans le domaine.

Cette conférence montre l'étendue du phénomène, pour lequel la prévention lors de la construction des nouveaux ouvrages est maintenant efficace, mais qui affecte assez largement les ouvrages construits jusque dans le milieu des années 1980. Aucun pays ne semble à l'abri de ce type de dégradations et le nombre d'ouvrages faisant l'objet de publications est vraisemblablement très inférieur au nombre réel, en particulier en Afrique où des cas maintenant bien connus n'ont pas encore fait l'objet de publications.

Cette conférence a fait apparaître l'importance de la recherche au Canada sur ce sujet, en particulier au Québec où les universités de Laval et de Sherbrooke ainsi que les différents organismes (CRIB, ICON/CANMET) et Hydro-Québec, impliqué en premier lieu pour ses ouvrages, sont très actifs.

Les progrès observés dans ce domaine apparaissent globalement lents, notamment pour ce qui concerne la connaissance et la compréhension des mécanismes des réactions en raison de la grande complexité des phénomènes et de la variabilité des matériaux et des environnements. Ce domaine fait en effet appel à des connaissances multidisciplinaires allant de la pétrographie à la mécanique, en passant par la chimie et la maîtrise des techniques de mesure.

Il semble que les approches anglo-saxonnes, qui attachent une grande part à l'approche expérimentale, ne consacrent toujours pas un effort conséquent dans les domaines plus théoriques, tant en physico-chimie qu'en mécanique. C'est pourquoi les approches françaises qui se développent sur ces aspects apparaissent souvent novatrices et constituent des voies prometteuses. Les collaborations actives engagées par EDF et le LCPC, depuis plusieurs années, avec les équipes universitaires travaillant en France dans ce domaine apparaissent de ce point de vue bien ciblées et très positives.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

ICAAR-CIRAG (2000), *Proceedings 11th International Conference Alkali-Aggregate Reaction in Concrete*, Québec, juin 2000, 1 402 pages.

Les actes de la conférence peuvent être obtenus auprès de International Center for Sustainable development of cement and concrete (ICON/CANMET), 405

Rochester street, Ottawa, Ontario Canada K1A0G1.

Un exemplaire est consultable chez Jeanne-Sylvine Guédon-Dubied.