

# Application de méthodes pétrographiques à l'évaluation de l'état de dégradation du béton affecté par l'alcali-réaction

Patrice RIVARD

Gérard BALLIVY

Université de Sherbrooke (Québec)

## RÉSUMÉ

Plusieurs procédures d'examen pétrographique, qualitatives ou quantitatives, ont été proposées afin d'évaluer le degré d'endommagement des ouvrages en béton. Parmi celles-ci, quelques-unes ont été appliquées à des ouvrages de masse atteints d'alcali-réaction. Une revue des méthodes pétrographiques les plus pertinentes pour l'examen de la qualité du béton est présentée. Les résultats d'examens pétrographiques réalisés sur divers types d'échantillons de béton (carottes provenant d'un barrage, cubes de béton, éprouvettes de laboratoire) sont ensuite présentés. Deux procédures ont été utilisées. La première repose sur l'imprégnation à la résine fluorescente et à l'acétate d'uranyle de plaques de béton polies. Un traitement informatique des images permet de quantifier le degré de fissuration et la quantité de gel de silice produits par l'alcali-réaction. La seconde méthode est celle du Damage Rating Index.

Les résultats obtenus démontrent que la pétrographie quantitative peut être utilisée avec succès pour évaluer l'endommagement des ouvrages en béton et pour comparer la dégradation de différentes sections. La pétrographie pourrait si possible être appliquée pour estimer le stade d'évolution de l'alcali-réaction et, par conséquent, aider à prédire l'expansion future de la masse de béton.

DOMAINE : Ouvrages d'art.

## ABSTRACT

### APPLICATION OF PETROGRAPHIC METHODS FOR EVALUATING THE STATE OF DETERIORATION IN CONCRETE AFFECTED BY THE ALKALI-AGGREGATE REACTION

*Several procedures using either qualitative or quantitative petrographic examination techniques have been proposed over the past decade to assess the degree of damage in concrete structures. Some of these techniques have focused on large concrete structures exposed to the alkali-aggregate reaction (AAR). In this paper, we begin by presenting a review of the most relevant petrographic methods for concrete condition assessment. Next, the results obtained from petrographic examinations on several concrete specimens (core recovered from a dam, large concrete cubes and laboratory prisms) are discussed. Two methods, performed on polished slabs, have been used. One is based on fluorescent resin, uranyl acetate impregnation and image analysis, and serves to quantify both the degree of cracking and the amount of silica gel produced by AAR. The other method is known as the Damage Rating Index.*

*The results obtained from these methods show that quantitative petrography can be successfully applied on concrete structures in order to assess the degree of deterioration and compare damage across different sections. Petrography could also be used to estimate the evolution stage of the alkali-aggregate reaction and therefore to assess the prediction of future expansion in the concrete specimen core.*

*FIELD: Structural engineering.*

## Introduction

Les ouvrages en béton peuvent être sujets à divers phénomènes physico-chimiques menant à leur détérioration progressive. Les causes des désordres sont variées : influence des cycles thermiques et de gel/dégel, attaque des aciers d'armature par les chlorures, réaction sulfatique, alcali-réaction, etc. La décision d'entreprendre ou non des travaux de réparation repose généralement sur l'évaluation du degré d'endommagement et de l'étendue de celui-ci. Les méthodes conventionnelles consistent à mesurer les propriétés mécaniques du matériau, comme la résistance à la compression et à la traction ou le module d'élasticité. Bien que ces techniques procurent des informations primordiales du point de vue du comportement mécanique de l'ouvrage, l'interprétation des résultats peut s'avérer problématique pour l'évaluation de l'endommagement par l'alcali-réaction. Ainsi, l'alcali-réaction affecte peu la résistance à la compression du béton alors que son module d'élasticité se trouve réduit de façon significative [1-3]. De plus, le type de béton étudié (composition, type de granulats, etc.), de même que son âge, peuvent influencer les résultats mécaniques. Enfin, les examens pétrographi-

ques traditionnels, comme celui décrit par la norme américaine ASTM C-856 : Petrographic examination of hardened concrete, fournissent plutôt des résultats qualitatifs et subjectifs.

Un système permettant d'obtenir une valeur quantitative, représentative de la qualité globale du béton de la structure étudiée, est par conséquent nécessaire. Cette méthode serait efficace pour comparer le degré relatif des dommages affectant différentes sections d'un même ouvrage, suivre l'évolution de l'endommagement dans le temps et ainsi évaluer le potentiel d'expansion résiduelle de l'ouvrage. Ces informations permettraient ainsi d'optimiser les travaux de réparation devant être entrepris.

## Contexte de l'étude

De nombreux articles ont été publiés sur la pétrographie du béton utilisée comme moyen de diagnostic des dommages observés dans les structures ou, en d'autres termes, comme moyen de détermination de l'origine des dommages. La présente étude met plutôt l'accent sur la pétrographie comme outil quantitatif pour évaluer l'endommagement du béton. Cet article comporte trois parties :

- ❶ une revue des méthodes pétrographiques utilisées pour décrire et mesurer l'endommagement du béton ;
- ❷ une présentation des résultats obtenus à partir de différents types de béton présentant divers degrés de symptômes d'alcali-réaction, une des causes de détérioration du béton les plus répandues ;
- ❸ une discussion portant sur les avantages et les inconvénients des méthodes pétrographiques.

## L'alcali-réaction

L'alcali-réaction (ou réaction alcalis-granulats) constitue un problème majeur au plan de la durabilité des bétons. Un très grand nombre de recherches ont été réalisées sur le sujet depuis les premières observations, au début des années 40, reliant la fissuration du béton et l'utilisation de certains granulats [4]. Nous nous limiterons ici à l'essentiel des généralités concernant les phénomènes de l'alcali-réaction. De nombreux ouvrages traitent plus en profondeur de cette pathologie du béton [5-7].

L'alcali-réaction est une réaction physico-chimique impliquant certaines phases siliceuses réactives des granulats et les ions hydroxydes alcalins en solution dans le béton. La silice est généralement stable en milieu neutre ou acide mais le béton (dont le pH de la solution interstitielle est généralement supérieur à 13) constitue un environnement particulièrement agressif vis-à-vis de certaines phases siliceuses. Ces phases sont la silice microcristalline (silex, chert), ou la silice faiblement cristallisée (opale). Suite à la dissolution de la silice, des produits de réaction potentiellement gonflants, appelés gels d'alcali-réaction, sont formés. En présence d'une quantité suffisante d'eau, les gels provoquent l'expansion du béton et la détérioration précoce de celui-ci. Les désordres peuvent apparaître dans les ouvrages en béton entre 2 et plus de 10 ans après leur construction. Le déclenchement et le développement de la réaction dépendent de plusieurs facteurs dont les principaux sont : la réactivité du granulat, la quantité d'alcalis en solution dans le béton, le degré d'humidité dans l'ouvrage et la température moyenne de service.

## Indices pétrographiques associés à l'alcali-réaction

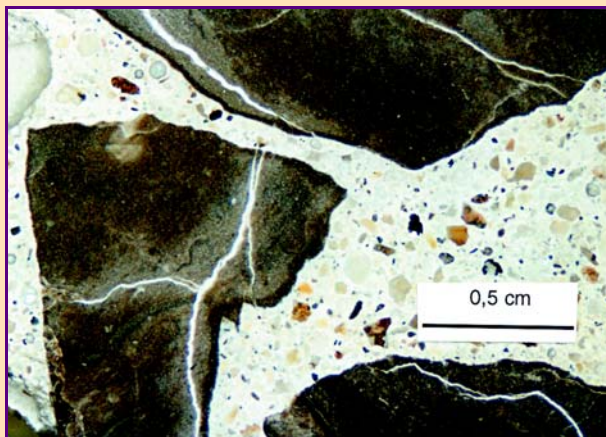
Certains symptômes sont caractéristiques d'un béton atteint d'alcali-réaction et permettent d'attribuer la cause des dommages observés en surface à l'alcali-réaction. Ces indices sont de deux ordres : les indices visibles à l'échelle de l'ouvrage entier et ceux visibles à l'échelle microscopique/macrosopique. Parmi ceux du premier ordre, on retrouve le motif de fissuration polygonale, observé chez la plupart des structures affectées par l'alcali-réaction, la présence d'exsudation blanchâtre, le déplacement de certaines parties de l'ouvrage et l'éclatement des granulats (pop-out). Cet article met toutefois l'accent sur les indices de réactivité observables à l'échelle microscopique/macrosopique. Ces principaux indices sont :

- ❶ **Auréole de réaction.** La plupart des granulats présentent une auréole de réaction foncée à la périphérie des particules réactives lorsque la réaction est présente. L'identification de l'auréole de réaction peut parfois être difficile autour des granulats foncés. Le mécanisme de formation de cette auréole n'est toutefois pas encore bien connu. Il semble que dans le cas du grès quartzitique de la formation de Potsdam, l'auréole soit attribuable à la précipitation de la silice dissoute [8].

② **Gel d'alcali-réaction.** Il a été mentionné que l'alcali-réaction génère un produit blanchâtre, le gel d'alcali-réaction. Ce gel peut avoir différents aspects : vitreux, résineux, cireux ou poudreux. Le gel peut se concentrer dans divers espaces vides du béton, comme les fissures ou les bulles d'air, allant parfois jusqu'à les remplir complètement. Le gel peut également se retrouver à l'interface pâte/granulat ou à l'intérieur même des particules réactives. Le microscope électronique à balayage équipé d'un analyseur chimique en dispersion d'énergie s'est souvent révélé un outil fort utile pour connaître la composition chimique des produits de l'alcali-réaction. Une technique impliquant un traitement des échantillons de béton avec une solution d'acétate d'uranyle a démontré un potentiel fort intéressant pour identifier la présence et la distribution de ces gels en les rendant fluorescents sous un rayonnement ultraviolet [9].

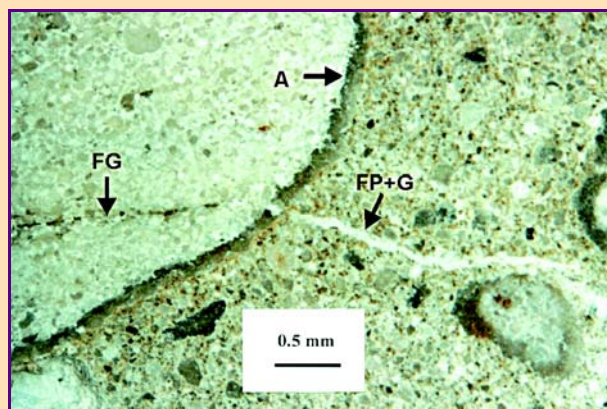
③ **Microfissuration.** Un autre indice révélateur de la réaction est le développement de microfissures à l'intérieur des particules réactives de granulat ainsi que dans la pâte de ciment. Bon nombre de calcaires siliceux présentent des veinules de gels silico-calco-alkalins à l'intérieur des particules réactives (fig. 1). La dimension de ces veinules peut varier de quelques dizaines de microns à près d'un millimètre. Puisque l'alcali-réaction est une réaction engendrant une expansion, les fissures ont tendance à se propager dans la pâte de ciment. La microfissuration n'est toutefois pas exclusive à l'alcali-réaction. Elle peut en effet avoir diverses origines, comme le retrait de séchage, les contraintes thermiques, l'effet des charges ou des contraintes appliquées, etc. Dans ces cas toutefois, et à moins d'être en présence de granulats gélifs ou ayant de faibles propriétés mécaniques, les fissures traverseront très rarement les particules de granulat, les contournant plutôt. Dans le cas d'alcali-réaction, la microfissuration est étroitement liée à l'expansion des granulats et/ou du gel de silice. Le motif de fissuration observé dans les échantillons de laboratoire conservés dans des conditions d'essais normalisés offrira une bonne indication du degré d'avancement de la réaction.

La figure 2 illustre les différents indices pétrographiques décrits ci-dessus, observés au microscope optique sur une plaque polie d'un béton incorporant un grès quartzitique.



*Fig. 1 - Veinules de gel à l'intérieur des particules de calcaire siliceux.*

*Fig. 2 - Indices pétrographiques de réactivité alcalis-granulats: auréole de réaction (A), fissure à l'intérieur du granulat (FG), fissure remplie de gel se propageant dans la pâte de ciment (FP + G).*



## Revue des principales méthodes pétrographiques

Les examens pétrographiques peuvent être divisés en deux grandes catégories, réparties selon le support d'observation. La première catégorie englobe toutes les méthodes exécutées sur des lames minces en lumière transmise. La deuxième inclut les méthodes sur plaques polies (ou demi-carottes de forage) en lumière réfléchie. Le lecteur désireux d'en connaître davantage sur la pétrographie appliquée au béton trouvera une excellente source de renseignements dans le manuel rédigé par St. John et *al.* [10].

Un travail considérable a été accompli en pétrographie appliquée au béton depuis le premier diagnostic de réaction entre le ciment et les granulats par Stanton en 1940. Parmi les études les plus marquantes, on retrouve celles de McConnell et *al.* [11] et celle de Idorn [12]. Les premières méthodes pétrographiques ont été développées spécifiquement pour l'identification des granulats potentiellement réactifs. Le US Bureau of Reclamation a réalisé d'importants travaux de défrichage dans ce domaine [13]. La pétrographie a grandement prouvé son efficacité dans la prévention de l'alcali-réaction par l'élaboration de méthodes permettant de rejeter les granulats potentiellement réactifs. Par ailleurs, l'examen pétrographique devient l'outil de prédilection pour confirmer ou infirmer la présence d'alcali-réaction comme cause des dommages observés.

### Quantification de la microfissuration

Il est reconnu que la fissuration du béton est généralement associée à l'endommagement de celui-ci. Par conséquent, les premières méthodes développées pour étudier la détérioration du béton reposaient sur la détection des fissures. La première étude publiée sur l'endommagement du béton remonte à la fin des années 20 [14]. Néanmoins, les premières techniques appliquées à l'étude de la microfissuration ont émergé dans les années soixante. L'utilisation de rayons X au travers de plaques de béton [15,16], suivie par la radiographie à neutron [17], ont donné des résultats intéressants. Ces méthodes requièrent néanmoins un appareillage lourd et compliqué et ont été abandonnées au profit de techniques plus simples et plus précises. Les techniques d'imprégnation à la résine ont alors commencé à être employées, principalement pour l'évaluation en lames minces de la porosité et de la fissuration de roches. Les premières lames minces de grandes surfaces ont été utilisées par Anderson et Peterson [18] pour étudier l'endommagement du béton. Au milieu des années 60, Brooms [19] fut parmi les pionniers à travailler avec des plaques de béton imprégnées avec une résine époxyde colorée. La résine incorporant un traceur fluorescent a, par la suite, remplacé la résine colorée. Le principal inconvénient de la résine époxyde réside dans le fait que les fissures les plus fines ne sont pas toujours remplies. Ainsi, pour une pénétration optimale, les échantillons doivent être placés sous vide. Cependant, l'imprégnation à la résine peut causer certains problèmes avec des granulats poreux, comme le grès. Les particules poreuses, en absorbant la résine, deviennent fluorescentes et peuvent ainsi mener à une interprétation erronée du motif de fissuration [20]. La figure 3 illustre une particule de grès complètement remplie de résine.

Au début des années 80, le microscope électronique à balayage (MEB) s'est révélé être un des meilleurs outils pour l'étude de la microfissuration. Cependant, les observations directes au MEB ne sont pas recommandées car le béton, séché et mis sous vide, est sujet à la création de nouvelles microfissures. Ollivier [21] a développé une procédure non destructive intéressante qui consiste à réaliser une empreinte de la surface étudiée avec un film d'acétylcellulose. Cette technique, appelée technique des répliques, permet d'étudier la même surface sur une période de temps donnée sans endommager le béton. Néanmoins, la surface d'observation est limitée à environ 2 cm<sup>2</sup>, une dimension peu représentative dans le cadre d'une étude quantitative.

Plusieurs nouvelles méthodes faisant appel à l'analyse des images par ordinateur ont été proposées au courant de la dernière décennie [22-26]. Ces méthodes permettent de travailler de façon automatique et ne reposent pas sur le jugement du pétrographe. Les images sont généralement acquises avec une caméra 3CCD installée sur un microscope optique et sont numérisées et traitées selon un algorithme développé spécifiquement pour le travail escompté. Ces procédures sont fondées sur la détection de fissures et utilisent habituellement des résines fluorescentes ou colorées pour rehausser le contraste entre les fissures et la pâte du ciment (fig. 4).

Salomon et Panetier [27] ont mis au point une procédure spécifique pour la quantification des fissures associées à l'alcali-réaction. Les échantillons sont imprégnés sous vide avec une résine fluores-

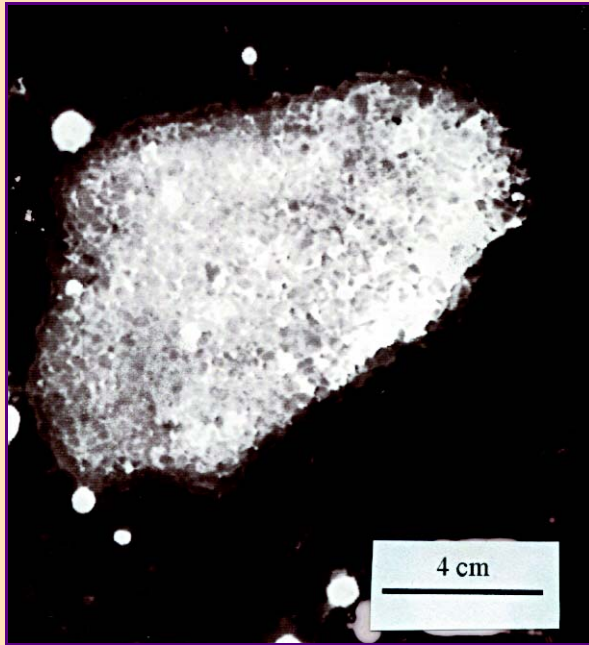
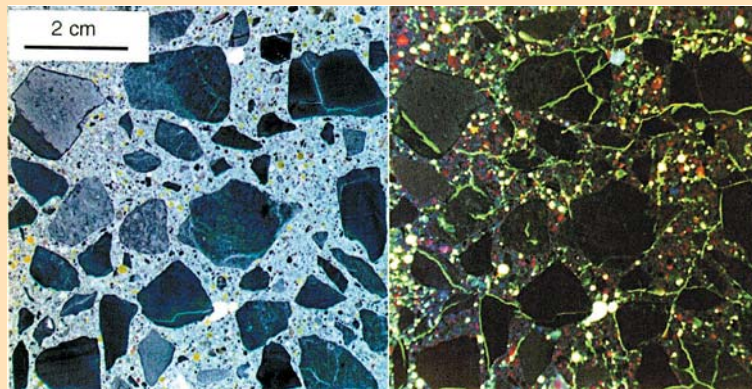


Fig. 3 - Particule de grès de Potsdam imprégnée de résine fluorescente.

Fig. 4 - Rehaussement de la fissuration par imprégnation à la résine fluorescente



a) Lumière naturelle.

b) Rayonnement ultraviolet.

cente. Les auteurs ont rapporté une certaine corrélation entre le degré de fissuration mesuré sur l'échantillon et le niveau de détérioration observé dans la structure à l'étude. Plus récemment, Ammouche et *al.* [28] ont présenté une procédure automatique de détection des microfissures par analyse d'images. L'observation est réalisée à une échelle de 10 à 300X sur des plaques polies imprégnées à l'aide d'un colorant rouge. Aucun procédé de traitement thermique ni de mise sous vide n'est requis, ce qui permet de limiter la création des microfissures artificielles. Avec un béton de matrice plus dense (mélanges ayant de faibles rapports eau/liant ou contenant des additions minérales), la teinture rouge est remplacée par un agent fluorescent. Selon les auteurs, les résultats se sont avérés fiables et reproductibles.

### Quantification du gel de silice

Il est reconnu que de grandes quantités de gel peuvent être observées dans des carottes provenant de structures faiblement endommagées alors que d'autres carottes provenant de structures sévèrement endommagées peuvent être exemptes de gel. Jusqu'à maintenant, aucune relation explicite n'a encore été démontrée entre la quantité de gel et le niveau d'expansion atteint par les bétons affectés

par l'alcali-réaction. Les études entreprises pour corrélérer ces deux paramètres étaient toutefois fondées sur la technique d'identification du gel par l'acétate de l'uranyle [20, 29, 30]. La quantification a été effectuée en calculant la superficie totale de gel fluorescent en fonction de la surface totale de la section observée. Il faut néanmoins souligner que la quantité de gel exprimée en termes de superficie n'indique pas toujours la quantité réelle de matière. Par exemple, des dépôts de gel disséminés dans la pâte de ciment couvriront une plus grande surface qu'une même quantité concentrée dans une bulle d'air. De plus, dans l'étude de Martineau et *al.* [30], les surfaces d'observation ont été obtenues par rupture en cisaillement et non par débitage à la scie. Cette procédure avait pour but d'éviter le délavage des gels lors du sciage. Toutefois, le risque de surestimer la quantité de gel est élevé en procédant ainsi, puisque l'échantillon se brise selon les plans de faiblesse (les fissures) et que le gel se trouve très concentré à ces endroits.

## Précautions à prendre dans les investigations

Certains facteurs peuvent influencer l'interprétation des données lors de la réalisation d'un examen pétrographique quantitatif. Afin de maximiser la fiabilité et la reproductibilité des résultats, les points suivants doivent être soigneusement pris en considération.

### Localisation des échantillons

Quel que soit le type de campagne d'investigation, l'échantillonnage représente une des étapes les plus importantes. Il va de soi qu'un nombre élevé d'échantillons fournira des résultats plus fiables et plus précis. En pratique toutefois, la quantité et l'emplacement des échantillons prélevés sont généralement dictés par des facteurs d'ordre économique et par la facilité d'accès à l'emplacement de l'échantillonnage.

Dans les barrages atteints d'alcali-réaction, il est reconnu que le nombre de fissures et leur dimension diminuent généralement avec la profondeur. Certains processus de dégradation, comme les cycles de mouillage/séchage, l'action du gel et les contractions thermiques, sont plus actifs près de la surface et accélèrent la détérioration du béton dans cette zone. La zone de surface n'est donc pas représentative de la masse globale du béton et le prélèvement d'échantillons provenant des premiers centimètres devrait être évité.

Finalement, le béton d'un ouvrage de masse est sujet à de grandes variations en termes de contraintes internes, de composition du mélange initial, de teneur en alcalis, d'humidité et de température. La British Cement Association [29] recommande un échantillonnage dans trois sections de chaque élément à l'étude (fondation, pilier, poutre, contrefort etc.), représentant chacune une zone saine, une zone caractéristique de l'ensemble de l'ouvrage et une zone endommagée. Quelques carottes devraient aussi être forées parallèlement aux fissures majeures afin d'en déterminer la profondeur.

### Préparation des échantillons

Les différentes étapes de préparation des échantillons sont très importantes et une attention particulière doit être apportée à cette partie du travail. En raison de la haute vitesse de la foreuse, les opérations de forage peuvent induire des microfissures dans les carottes, surtout dans le cas de bétons de mauvaise qualité ou fortement dégradés. Une microfissuration supplémentaire peut aussi être provoquée dans des carottes extraites d'un environnement confiné (comme c'est le cas de la plupart des ouvrages de masse atteints d'alcali-réaction) à cause du relâchement subit de contraintes de compression. Dans certains cas, la décompression pourrait atteindre jusqu'à 2 500  $\mu\epsilon$  [31].

La superficie des échantillons doit être suffisamment grande afin que les résultats soient représentatifs de la qualité du béton. Le fait de travailler sur de petits échantillons augmente la variance des mesures. Grattan-Bellew [32] suggère une superficie d'au moins 250 cm<sup>2</sup>. Dans le cas où seuls de petits échantillons sont disponibles, l'examen pétrographique sera effectué avec un grand nombre d'échantillons pour compenser leur taille réduite.

Lors d'une étude quantitative, de meilleurs résultats seront obtenus en coupant les échantillons en tranches plutôt qu'en les cassant. Une surface coupée offre une orientation de fissuration aléatoire. Par contre, les surfaces fracturées constituent généralement des zones de faiblesse. L'examen sur

surfaces fracturées serait donc réalisé le long d'un plan de fracture qui pourrait même être recouvert de gel de silice. Il est à noter que la coupe et le polissage peuvent également créer une certaine microfissuration parasite. Le choix du type de scie utilisée est essentiel. Une scie diamantée à basse vitesse de rotation et munie d'un système de déplacement automatique est donc recommandée. L'épaisseur de la plaque coupée devrait être suffisante pour prévenir la propagation de fissures pendant les opérations de préparation, soit environ 2 à 3 cm d'épaisseur. Dans le cas d'un béton sévèrement dégradé, l'immersion de l'échantillon dans une résine époxyde à prise rapide avant la coupe est nécessaire. Cette opération permettra de conserver l'échantillon et ses caractéristiques pétrographiques, évitant ainsi la perte de morceaux pendant la coupe et le polissage.

Un lessivage du gel de silice peut se produire durant la coupe et le polissage. Un lubrifiant non aqueux devrait être employé pour éviter la perte du gel.

### **Grossissement utilisé**

Il est évident que le nombre d'indices pétrographiques relevés lors de l'examen est influencé par le grossissement avec lequel l'examen est réalisé. Un fort grossissement conduira à l'observation d'un plus grand nombre de fissures. Cependant, cela n'est pas toujours souhaitable dans un contexte de quantification des dommages. Plusieurs microfissures, comme celles provoquées par le retrait du séchage, ne sont pas reliées aux mécanismes de détérioration du béton et ne représentent pas de problèmes majeurs. De plus, ces microfissures peuvent provenir de la collecte et de la préparation de l'échantillon. Enfin, une étude à fort grossissement augmente le temps d'investigation. Il semble qu'un grossissement compris entre 10X et 30X soit optimal pour la quantification des désordres reliés à l'alcali-réaction [27, 33-35].

### **Polissage des plaques**

Le polissage des plaques de béton est effectué à l'aide d'abrasif de calibre graduel (du plus grossier au plus fin). Un lubrifiant non aqueux devrait être utilisé afin d'éviter la dissolution des composés solubles dans l'eau tel que le gel de silice. Les tapis diamantés sont recommandés pour le polissage plutôt que les poudres abrasives car ces dernières laissent des résidus pouvant remplir certaines fissures ou les bulles d'air et ainsi masquer la présence de produits de réaction à l'intérieur de celles-ci. Dans le cas de plaques imprégnées à la résine, un polissage excessif enlèvera trop de résine et les fissures n'ayant pas été pénétrées en profondeur ne seront plus visibles.

## **Application de la pétrographie quantitative**

### **Méthodes pétrographiques présentées**

Afin de fournir une information quantitative, la méthode pétrographique ne doit pas être purement descriptive : elle doit reposer sur une liste de paramètres mesurables spécifiques (longueur, nombre, densité, etc.) et pas seulement sur le jugement du pétrographe. La procédure doit aussi permettre d'identifier l'alcali-réaction comme responsable des dommages observés. Les caractéristiques propres à cette réaction délétère doivent ainsi être prises en considération.

Certaines méthodes visant à quantifier l'ampleur des dommages dans le béton ont été proposées au cours des dernières années. Par exemple, Sims et *al.* [34] ont proposé une méthode de quantification à partir d'indices de réactivité relevés par microscopie optique sur lames minces. Quelques-unes de ces méthodes n'ont peut-être jamais été publiées et n'ont donc pu être décrites dans cet article. Les deux méthodes abordées ici ont été utilisées par les auteurs pour la quantification de l'endommagement ; elles reposent sur la quantification d'indices pétrographiques d'endommagement relevés sur des sections de béton polies (éprouvettes de laboratoire ou carottes de forage).

### **Damage Rating Index**

Le Damage Rating Index (DRI) a été développé par le Dr Grattan-Bellew du Conseil de Recherche National du Canada [33]. Cette méthode visait initialement à évaluer la qualité du béton affecté par l'alcali-réaction, mais pourrait être modifiée pour tenir compte de l'endommagement causé par d'autres processus de dégradation. Le DRI a récemment été utilisé avec succès dans plusieurs cas

impliquant des structures affectées par l'alcali-réaction au Canada [2, 20, 32, 36-39] et au Brésil [40].

Le DRI s'exécute à l'aide d'un stéréomicroscope à un grossissement de 16X. La méthode consiste à compter le nombre d'indices pétrographiques associés à l'alcali-réaction à l'intérieur de chaque carré d'une grille de 1,5 cm de côté. Un facteur pondérateur spécifique est attribué à chaque type d'indice. Ce facteur a été établi en fonction de son importance relative dans un contexte de dégradation reliée à l'alcali-réaction et permet d'atténuer l'influence des mécanismes de dégradation (tableau I). Les différentes sommes obtenues pour chaque indice pondéré sont additionnées et normalisées pour une surface de 100 cm<sup>2</sup>. Le chiffre calculé est le Damage Rating Index, une valeur quantitative représentant le degré d'endommagement pour un spécimen type d'échantillon donné. Par exemple, l'endommagement est beaucoup plus important chez un échantillon ayant obtenu une valeur de 600 que chez un autre ayant obtenu une valeur de 100. L'article de Dunbar et Grattan-Bellew [36] rapporte plusieurs cas où le DRI a permis de comparer le niveau d'endommagement de carottes de béton provenant de barrages et de centrales hydroélectriques de l'est du Canada.

**TABLEAU I**  
**Facteur pondérateur appliqué à chaque type d'indices pétrographiques d'alcali-réaction**

| Indices                                     | Facteur |
|---|---------|
| Granulat avec fissure (CA)                  | 0,25    |
| Granulat avec fissure et gel (CA + G)       | 2       |
| Décohésion d'un granulat (D)                | 3       |
| Auréole de réaction (R)                     | 0,5     |
| Pâte de ciment avec fissure (CP)            | 2       |
| Pâte de ciment avec fissure et gel (CP + G) | 4       |
| Bulle d'air avec gel (AV)                   | 0,5     |

D'autre part, Shrimmer [38] rapporte deux cas de structures en béton où le DRI a été utilisé pour déterminer le degré d'endommagement causé par l'alcali-réaction et où la pétrographie a permis d'évaluer le rapport coût/efficacité des travaux de réparation. Dans le premier cas impliquant un mur de soutènement, des valeurs élevées de DRI ont été mesurées pour les échantillons prélevés près de la surface alors que des valeurs nettement plus faibles ont été mesurées à de plus grandes profondeurs. Le DRI a permis de sélectionner les emplacements où les travaux de réparation ont été exécutés (par exemple, l'installation d'ancrage dans les parties détériorées). Le deuxième cas impliquait une jetée en béton. Le DRI a permis de localiser les endroits où le béton était sévèrement fissuré, même si les dommages étaient peu visibles en surface. Les poutres originales ont été remplacées suite à l'investigation pétrographique.

Ces exemples illustrent la pertinence de la pétrographie quantitative comme moyen d'évaluation de l'endommagement du béton.

### ***Pétrographie Quantitative par Analyse d'Images (PQAI)***

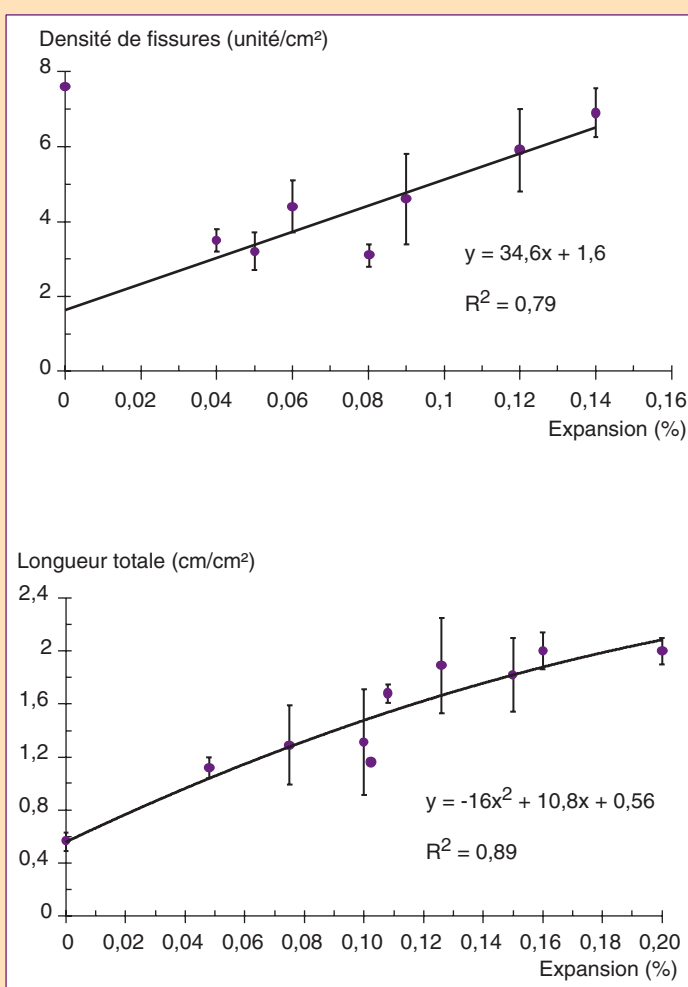
Rivard et al. [20] ont proposé une méthode automatique reposant sur le traitement et l'analyse d'images prises à partir de plaques imprégnées de résine fluorescente et d'une solution d'acétate d'uranyle. La résine est utilisée pour visualiser le degré de fissuration tandis que l'acétate d'uranyle est employé pour évaluer la quantité de gel de silice. La procédure complète est décrite dans le mémoire de Rivard [35]. Trois paramètres ont été sélectionnés pour leur précision dans la quantification de l'endommagement : la longueur totale de fissuration, la densité de fissuration et la superficie totale de gel de silice. L'orientation préférentielle des fissures peut aussi être mesurée. Cette méthode a permis d'établir une corrélation directe entre le degré de fissuration relié à l'alcali-réaction et le niveau d'expansion mesuré sur des éprouvettes de laboratoire. Certaines applications de la méthode seront abordées plus loin.



## Résultats obtenus sur des éprouvettes de laboratoire

Une première étude systématique portant sur l'évaluation de l'endommagement par méthode pétrographique est parue en 2000 [20]. Les bétons étudiés incorporent soit le calcaire Spratt, soit le grès de Potsdam. Ces deux granulats sont bien connus pour leur réactivité dans les bétons et ont provoqué la détérioration précoce de plusieurs ouvrages dans l'est du Canada [41,42]. Les mesures par PQAI ont révélé une relation claire entre le niveau d'expansion des éprouvettes et le degré de fissuration. En ce qui concerne le calcaire Spratt, la meilleure corrélation est donnée par le paramètre de longueur totale de fissuration, alors que la densité de fissuration semble la plus représentative dans le cas du grès de Potsdam (fig. 5). La PQAI a également indiqué que la fissuration dans les éprouvettes est isotrope, ce qui est attribuable à l'expansion libre des éprouvettes (aucun confinement) et à leur petite taille (75 × 75 × 300 mm).

Fig. 5 - Relation entre la fissuration et l'expansion

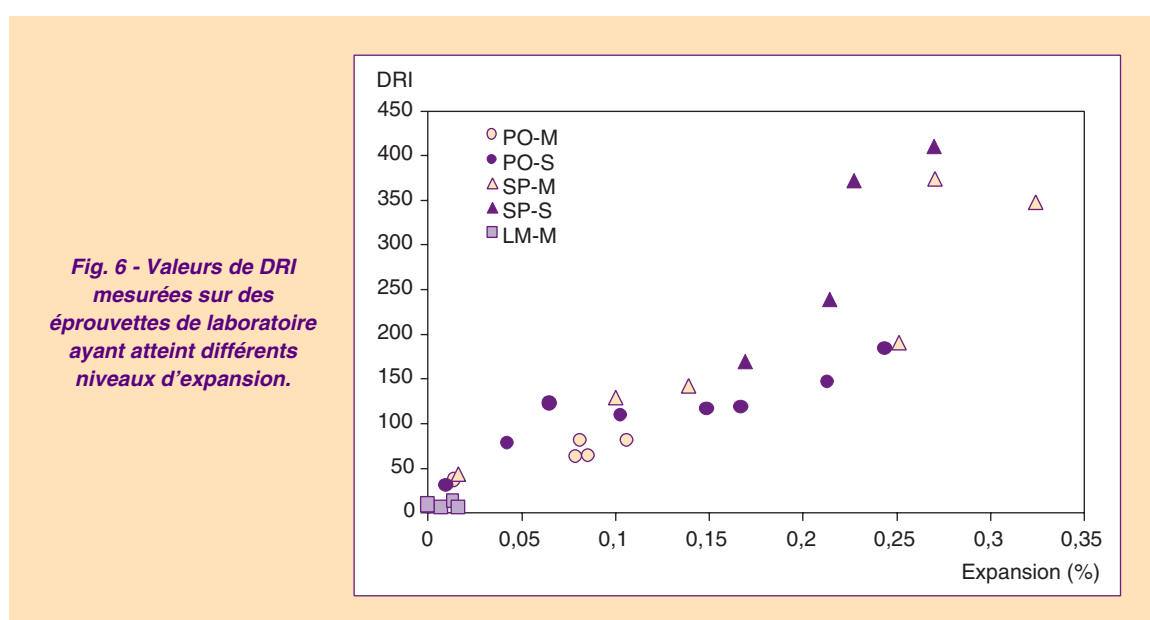


Aucune relation explicite n'a pu être établie entre la quantité de gel, mesurée par la méthode à l'acétate d'uranyle, et le niveau d'expansion ou le degré de fissuration des éprouvettes de laboratoire.

Dans le cadre d'une nouvelle étude (non publiée), cinq autres séries d'éprouvettes (75 × 75 × 300 mm) ont été fabriquées à partir de différents mélanges de béton et ont été soumises à un essai normalisé dans le but de mesurer l'expansion générée par l'alcali-réaction selon la norme canadienne CSA A23.2-14A, (température de 38 °C en enceinte humide). La composition des mélanges est indiquée dans le tableau II. Un échantillonnage systématique a été effectué à divers niveaux d'expansion et l'endommagement des échantillons sélectionnés a été évalué à l'aide de la méthode du Damage Rating Index.

**TABLEAU II**  
Composition des mélanges de béton des éprouvettes de laboratoire

| Caractéristiques   | Mélanges          |                   |                   |                   |                       |
|--|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-----------------------|
|  | PO-M<br>(réactif) | PO-S<br>(réactif) | SP-M<br>(réactif) | SP-S<br>(réactif) | LM-M<br>(non réactif) |
| Granulat   | Grès de Potsdam   | Grès de Potsdam   | Calcaire Spratt   | Calcaire Spratt   | Calcaire Limeridge    |
| Contenu en ciment (kg/m <sup>3</sup> )                     | 320               | 420               | 320               | 420               | 320                   |
| Granulat grossier (kg/m <sup>3</sup> )                     | 1 097             | 1 063             | 1 142             | 1 113             | 1 142                 |
| Granulat fin (kg/m <sup>3</sup> )                          | 762               | 739               | 741               | 742               | 741                   |
| Na <sub>2</sub> O <sub>éq</sub> total (kg/m <sup>3</sup> ) | 4,00              | 5,25              | 4,00              | 5,25              | 4,00                  |
| E/C  | 0,55              | 0,40              | 0,55              | 0,40              | 0,55                  |



Il est clair que l'endommagement tel que mesuré par le DRI augmente avec le niveau d'expansion (fig. 6). La dispersion des points est toutefois plus grande pour des niveaux élevés d'expansion. La méthode permet également de discerner le béton non réactif des bétons réactifs. Malgré des compositions différentes (et par conséquent, des propriétés mécaniques différentes), il ne semble pas y avoir de distinction marquée entre les bétons S et les bétons M incorporant le même granulat.

Les résultats fournis par les deux méthodes sont grandement influencés par la nature pétrographique du granulat et par son mécanisme de réaction [43]. La procédure par analyse d'images avec imprégnation fluorescente est adaptée pour un granulat de type calcaire comme le calcaire Spratt, dont le mécanisme d'expansion implique l'initiation de fissures dans les particules, qui se propagent par la suite dans la pâte du ciment. Par contre, le mécanisme de réaction particulier au grès de Potsdam, où la silice intergranulaire se trouve dissoute et laisse des vides remplis par la résine fluorescente, rend la méthode moins efficace.

### Résultats obtenus sur des cubes de béton

Huit cubes de béton de 35 cm de côté ont été fabriqués en laboratoire afin d'étudier l'effet de l'armature sur le développement de l'alcali-réaction [3]. Deux mélanges différents ont été conçus (béton structural et béton de masse) incorporant comme granulat le calcaire Spratt. Deux gâchées ont été préparées à partir de chacun des mélanges : une première considérée non réactive et une seconde rendue réactive par l'addition de NaOH à l'eau de gâchage. La composition des mélanges est indiquée dans le tableau III.

**TABLEAU III**  
**Composition des mélanges des cubes**

| Caractéristiques   | Armature | Béton structural |         | Béton de masse |         |
|--|----------|------------------|---------|----------------|---------|
|  | Non armé | Non réactif      | Réactif | Non réactif    | Réactif |
|  |          | Armé             | SN-1    | SR-1           | MN-1    |
|  |          | SN-2             | SR-2    | MN-2           | MR-2    |
| Contenu en ciment (kg/m <sup>3</sup> )                     |          | 365              | 360     | 250            | 250     |
| Granulat grossier (kg/m <sup>3</sup> )                     |          | 990              | 975     | 1200           | 1190    |
| Granulat fin (kg/m <sup>3</sup> )                          |          | 855              | 845     | 800            | 790     |
| Na <sub>2</sub> O <sub>éq</sub> total (kg/m <sup>3</sup> ) |          | 1,8              | 3,9     | 1,25           | 5,6     |
| E/C  |          | 0,50             | 0,50    | 0,66           | 0,66    |

Pour chacune des gâchées, deux cubes avec et sans cage d'armature ont été coulés. Les cubes ont été entreposés à une température de 38 °C et à plus de 95 % d'humidité relative. Tous les cubes ont fait l'objet d'instrumentation afin de suivre les expansions au sein de ceux-ci pendant une période de plus de 180 semaines.

Les résultats du Damage Rating Index, mesurés après 28 semaines, sont présentés dans le tableau IV. Les valeurs mesurées varient entre 14 (SN-2) et 289 (MR-2).

**TABLEAU IV**  
**DRI - Résultats de l'examen pétrographique sur les cubes**

| Cube | Expansion de surface | DRI total |
|------|----------------------|-----------|
| SN-1 | 0,02 %               | 20        |
| SN-2 | 0,03 %               | 14        |
| SR-1 | 0,21 %               | 253       |
| SR-2 | 0,14 %               | 197       |
| MN-1 | 0,01 %               | 74        |
| MN-2 | 0,01 %               | 48        |
| MR-1 | 0,17 %               | 201       |
| MR-2 | 0,11 %               | 289       |

### ***Cubes réactifs vis-à-vis non réactifs***

Les valeurs de DRI obtenues pour les cubes réactifs sont nettement plus élevées que celles obtenues pour les cubes non réactifs. Les valeurs des cubes réactifs oscillent entre 197 et 289, alors que ces valeurs varient entre 14 et 72 pour les cubes non réactifs. L'endommagement des cubes non réactifs provient vraisemblablement des contraintes thermiques des cubes et du retrait de séchage des carottes car plusieurs fissures fines ont été observées dans la pâte de ciment.

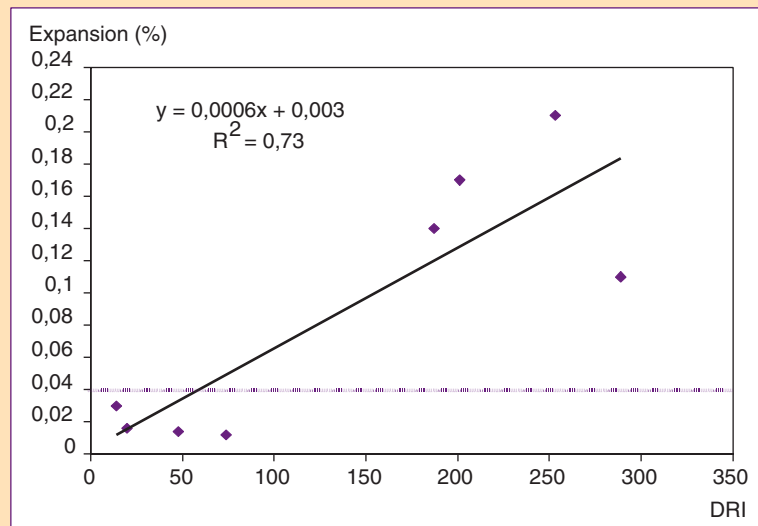
### ***Cubes armés vis-à-vis non armés***

Le rôle de l'armature vis-à-vis de l'endommagement semble contradictoire, notamment avec les cubes réactifs. Dans le cas des bétons structuraux, l'armature a réduit le degré d'endommagement, les valeurs de DRI ayant chuté de 22 %. Comme l'armature a réduit l'expansion en surface de 33 %, il est normal que l'on retrouve moins de fissuration dans les échantillons armés. Avec les bétons de masse, par contre, l'endommagement était plus important en présence d'armature, soit une augmentation de 44 % des valeurs de DRI. Ce dernier cas est problématique car le DRI montre une

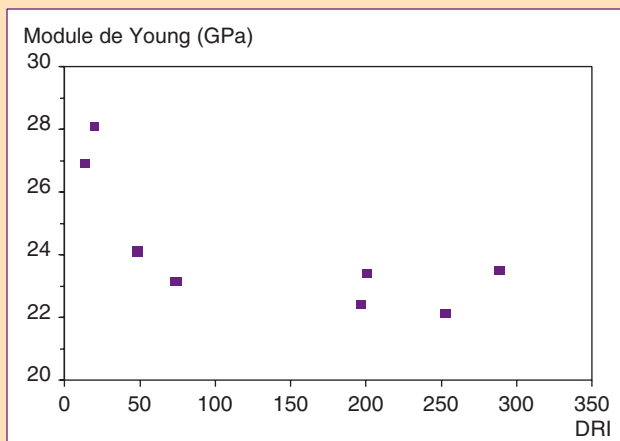
certaine corrélation avec les expansions mesurées à la surface des cubes, sauf pour le cube MR-2 (fig. 7). La valeur de DRI de ce cube est élevée en raison du grand nombre de fissures qui ont été relevées dans la pâte de ciment alors que la fréquence des autres indices pétrographiques est, somme toute, « normale » vu son niveau d'expansion. Il est possible que l'armature ait favorisé des contraintes de confinement suffisamment importantes pour qu'une fois la carotte extraite du cube, le relâchement de ces contraintes ait créé plusieurs fissures dans la pâte de ciment.

Des essais visant à connaître les propriétés mécaniques du béton ont été menés sur certaines carottes forées dans les huit cubes. Aucune corrélation n'a pu être établie entre la résistance à la compression du béton et les valeurs de DRI. Cependant, une certaine tendance est observée en ce qui concerne le module de Young et le DRI (fig. 8). Cela corrobore les études expérimentales qui ont démontré que les bétons atteints d'alcali-réaction montrent une perte de leur module d'élasticité qui se stabilise à long terme, de même qu'une réduction de la vitesse des ondes ultrasoniques [1, 2, 44-46].

**Fig. 7 - Corrélation entre l'expansion mesurée à la surface des cubes et les valeurs de DRI.**



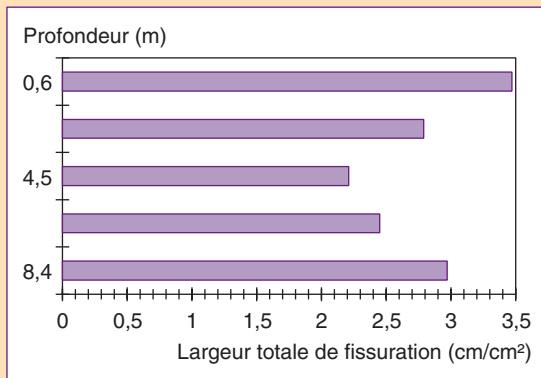
**Fig. 8 - Relation entre le module de Young et les valeurs de DRI.**



### Résultats obtenus sur une carotte prélevée dans un barrage atteint d'alcali-réaction

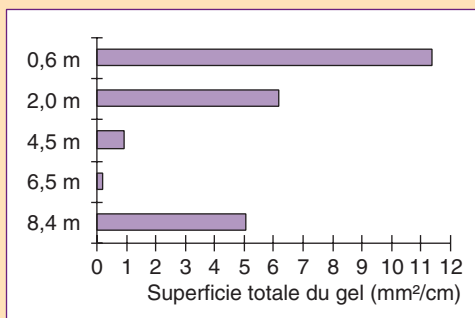
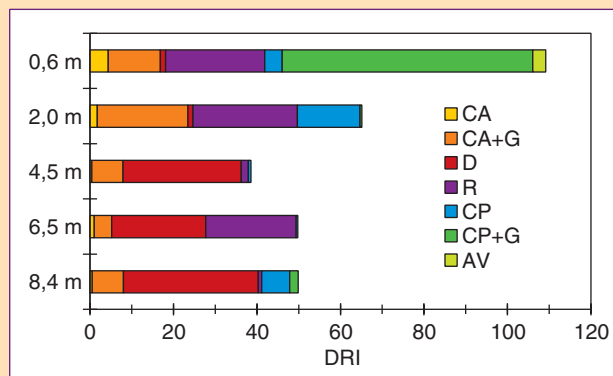
Une carotte d'une longueur de 10 m a été extraite d'un barrage hydroélectrique situé dans la province de Québec au Canada. Différentes sections de la carotte ont été analysées par les deux méthodes pétrographiques décrites précédemment [20].

Le DRI et la PQAI ont révélé que le béton est endommagé sur toute la longueur de la carotte et que la détérioration est plus importante aux extrémités de celle-ci (fig. 9 et fig. 10). Cela corrobore le



**Fig. 9 - Quantification automatique de la fissuration sur carotte de barrage [20].**

**Fig. 10 - Résultats du DRI sur carotte de barrage [20].**



**Fig. 11 - Distribution du gel de silice dans la carotte de forage [20].**

modèle généralement accepté que l'endommagement est moindre au centre de la structure, phénomène attribuable au confinement plus élevé à cet endroit. De plus, les facteurs environnementaux et physiques, comme l'action du gel, les contraintes thermiques et les cycles de mouillage/séchage, sont très actifs près de la surface, ce qui accélère la détérioration du béton dans cette zone. La PQAI a indiqué que la fissuration possède une orientation préférentielle horizontale, ce qui corrobore les mesures de contraintes calculées dans le barrage et qui prédisaient une telle orientation des fissures [47].

La mesure de la quantité de gel dans la carotte a donné des résultats intéressants, c'est-à-dire une tendance semblable à celle obtenue lors de la quantification du degré de fissuration par la PQAI et le DRI (fig. 11).

Il demeure néanmoins délicat d'extrapoler à l'ensemble de l'ouvrage les résultats obtenus en deux dimensions sur des sections relativement petites préparées à partir d'une seule carotte de forage.

## Discussion

### Avantages des méthodes pétrographiques

#### *Prévention et diagnostic de l'alcali-réaction*

Les lames minces sont idéales pour la prévention et le diagnostic de l'alcali-réaction [6, 48]. Elles permettent, entre autres, l'observation des phases minéralogiques et de la microtexture des granulats, ce qui n'est pas possible avec les techniques pétrographiques sur plaques polies. L'emploi du microscope polarisant et d'un compteur de points permet une bonne approche du pourcentage de minéraux réactifs [49]. Afin de rehausser la visibilité des microfissures, une résine fluorescente peut également être appliquée.

#### *Étude qualitative et quantitative de l'alcali-réaction*

Les observations sur plaques polies permettent l'identification de plusieurs indices pétrographiques caractéristiques de l'alcali-réaction, tels que l'auréole de réaction, le motif et l'aspect de la fissuration, l'aspect des dépôts de gel, etc. Ces indices permettent de conclure sur la présence d'alcali-réaction et sur l'importance de ce mode de dégradation dans l'échantillon observé par rapport aux autres modes potentiellement présents. De plus, la surface d'observation sur plaques polies est beaucoup plus grande qu'avec des lames minces, ce qui constitue un net avantage.

Les résultats présentés dans cet article ont démontré que les méthodes pétrographiques permettent de connaître et de quantifier, de façon relativement fiable, le niveau d'endommagement du béton et le degré d'avancement de la réaction. Couplées aux essais conventionnels de caractérisation des propriétés mécaniques, des renseignements d'une grande utilité sont ainsi obtenus.

En outre, la quantification de certains paramètres (comme la longueur des fissures, la densité et l'orientation préférentielle de la microfissuration) est facilement et rapidement réalisable à l'aide de logiciels spécialisés en analyse d'images.

#### *Faible coût*

L'observation sur plaques polies nécessite un équipement de base relativement simple et facilement accessible (équipement de polissage, stéréomicroscope), ce qui en fait une méthode peu onéreuse.

#### *Temps d'acquisition des données (méthodes automatiques)*

Les méthodes pétrographiques par analyse d'images sont beaucoup plus rapides à exécuter que les méthodes manuelles et le fait de disposer d'un système de déplacement de la plate-forme et de capture d'images programmables réduit de façon importante le temps d'opération. Le système décrit dans cet article permet d'analyser et de traiter une surface de 56 cm<sup>2</sup> en moins de 8 minutes. Un tel système permet aussi d'acquérir des données sans que l'utilisateur soit présent et ainsi d'effectuer les opérations de nuit.

#### *Reproductibilité (méthode automatique)*

La méthode par analyse d'images permet une bonne reproductibilité des mesures. Des examens pétrographiques successifs ont été menés sur une même plaque : une première analyse a été réalisée puis une seconde après que la plaque ait subi une rotation de 90 degrés dans le sens horaire. Les résultats ont montré très peu de différence : le coefficient de variation calculé pour les différents paramètres (longueur totale de fissures, etc.) oscillent entre 2,6 % et 8,9 % pour les bétons fabriqués avec le calcaire Spratt et entre 0 % et 2,5 % pour les bétons fabriqués avec le grès de Potsdam.

### Inconvénients des méthodes pétrographiques

#### *Taille de l'échantillon*

Il s'avère difficile de mener des études quantitatives fiables en lames minces. Les petites surfaces d'observation ne donnent pas une image représentative de l'ensemble du béton. Les défauts et les

détails observés sont isolés du reste de l'échantillon, ce qui rend l'examen inefficace pour estimer l'étendue des dommages observés. De plus, dans le cas de béton de barrage, il n'est pas rare de retrouver des particules de granulat dont le diamètre soit supérieur à 30 cm. La préparation de lames minces recouvrant une proportion adéquate du rapport granulat/pâte de ciment exige alors un outillage spécifique et onéreux, de même qu'un personnel expérimenté et compétent. Un problème additionnel provient de la microfissuration artificielle pouvant être induite lors de la préparation de telles lames. L'article de St. John [48] discute des avantages et des problèmes liés aux lames minces de grand format.

### ***Reproductibilité (méthode manuelle)***

L'utilisation d'une méthode non automatique amène invariablement une certaine erreur de biais de la part de l'opérateur. Dans le cas de la méthode du Damage Rating Index (DRI), Dunbar et Grattan-Bellew [36] rapportent que le coefficient de variation entre trois opérateurs travaillant sur le même échantillon et le même matériel était de 16,6 %. Rivard et al. [43] ont aussi comparé les résultats obtenus par un opérateur ayant peu d'expérience en pétrographie à un opérateur plus expérimenté avec le DRI. Les valeurs de DRI obtenues ont été relativement similaires pour un échantillon faiblement endommagé. Toutefois, la différence entre les résultats augmente en fonction du niveau d'endommagement. Une méthode comme le DRI doit toujours être exécutée par un pétrographe expérimenté (et de préférence toujours le même) afin d'obtenir des résultats fiables, reproductibles et comparables. Les méthodes automatiques par analyses d'images permettent de s'affranchir de ce biais.

### ***Méthode destructive***

Les méthodes pétrographiques, tout comme les essais conventionnels visant à déterminer les propriétés mécaniques du béton, ont l'inconvénient d'être destructives puisqu'un échantillon doit être prélevé de la structure investiguée. Un suivi de l'endommagement dans le temps ne peut donc pas être réalisé sur un même échantillon. À l'échelle d'une structure, néanmoins, un tel suivi peut être possible en prélevant des échantillons espacés de quelques centimètres.

### ***Temps de préparation des échantillons***

Le temps de préparation des échantillons peut constituer un inconvénient lorsque plusieurs plaques doivent être analysées, surtout si l'équipement de polissage n'est pas automatisé. En outre, la procédure d'imprégnation à la résine fluorescente d'une plaque de 56 cm<sup>2</sup> peut prendre jusqu'à 16 heures du fait qu'il faut laisser durcir la résine avant l'étape de polissage.

### ***Temps d'acquisition des données (méthodes non automatiques)***

L'utilisation de méthodes pétrographiques non automatiques peut nécessiter plusieurs heures de travail. L'observation d'une surface d'environ 100 cm<sup>2</sup> selon la méthode du DRI peut prendre de 20 à 30 min selon le degré d'endommagement de l'échantillon et l'expérience du pétrographe.

### ***Influence de la nature du granulat réactif***

La nature du granulat a un effet sur le mécanisme de réaction, de même que sur les indices pétrographiques de réactivité. Par exemple, le gonflement associé au grès de Potsdam génère moins de fissures dans le béton réactif que le gonflement associé au calcaire Spratt [20]. De même, l'indice pétrographique le plus fréquemment observé dans les bétons dégradés contenant le grès de Potsdam est l'auréole de réaction alors que cet indice est pratiquement absent dans les bétons dégradés incorporant le calcaire Spratt. Un autre exemple est l'indice de décohésion des granulats. Cet indice de réactivité est rarement observé avec les granulats concassés. En revanche, les granulats « naturels », comme les graviers de rivière, à la surface polie et arrondie, présentent souvent un décollement de l'interface pâte-granulat dans les bétons dégradés.

Ces exemples illustrent bien que la quantification de l'endommagement, à partir d'indices pétrographiques de réactivité, peut donner des résultats légèrement différents selon le granulat présent dans le béton examiné.

## Conclusion

L'examen pétrographique est un outil relativement peu onéreux et requérant un minimum d'équipement. Beaucoup de renseignements peuvent en être tirés : cause des désordres observés, degré d'endommagement de l'ouvrage, distribution et répartition des fissures, etc. Dans plusieurs cas, la pétrographie quantitative s'est avérée efficace pour mesurer l'ampleur des dommages dans une structure affectée par l'alcali-réaction, facilitant ainsi la planification des travaux de réparation. Les deux méthodes présentées dans cet article, chacune avec leurs avantages et leurs inconvénients, ont fourni des valeurs quantitatives qui ont permis de comparer l'endommagement entre différentes portions d'un barrage ou entre différents mélanges de béton. Il a été montré qu'il existe une relation entre le degré de fissuration et le niveau d'expansion des bétons atteints d'alcali-réaction. La prise en compte d'indices pétrographiques associés à l'alcali-réaction a aussi permis d'évaluer son degré d'avancement.

Les méthodes pétrographiques de quantification automatique de la fissuration par imprégnation de résine fluorescente sont bien adaptées pour des analyses réalisées sur des bétons peu poreux ou contenant des granulats peu poreux. Par contre, ces méthodes conviennent moins bien à des bétons très poreux ou contenant des granulats poreux. Dans ces cas, la pâte de ciment ou les particules poreuses, en absorbant la résine, deviennent fluorescentes, ce qui peut mener à une interprétation erronée du motif de la fissuration.

Par ailleurs, aucune procédure fiable utilisant une solution d'acétate d'uranyle n'a encore permis de corrélérer la quantité de gel de réaction avec le gonflement ou la dégradation des bétons de laboratoire.

Un programme systématique de collecte d'échantillons pour le suivi pétrographique de l'endommagement des structures atteintes d'alcali-réaction permet d'évaluer la vitesse de progression de la réaction et son ampleur. Un indice pétrographique d'endommagement devrait ainsi être incorporé dans tout programme d'évaluation des travaux d'entretien et de réparation des ouvrages en béton. La pétrographie présente toutefois l'inconvénient d'être une technique destructive car des forages doivent nécessairement être réalisés dans la structure étudiée.

Des recherches supplémentaires seront nécessaires de la part des pétrographes pour bien évaluer l'influence de chaque type de granulats concernant les indices pétrographiques de réaction. Une banque de données pourrait être créée, rassemblant toutes les observations qualitatives et quantitatives réalisées en fonction du type de granulats étudiés.

D'autres points restent à explorer, tel que l'effet du relâchement des contraintes sur la fissuration ou l'application de la pétrographie quantitative à l'étude des propriétés mécaniques du béton. Une des voies prometteuses est la corrélation entre des observations pétrographiques et des résultats provenant de techniques non destructives d'évaluation de l'endommagement tels que la tomographie sonique ou le radar. Cela permettra de valider ces dernières techniques et améliorer leur précision et l'interprétation des résultats. De tels travaux sont actuellement en cours à l'Université de Sherbrooke.

---

***Remerciements.** Les auteurs aimeraient remercier les membres du CRIB pour leur aide au cours de ce projet. La contribution du Dr Benoît Fournier, du Dr Patrick Grattan-Bellew et du Dr Rolando Lastra est également soulignée. Cette étude n'aurait pu être réalisée sans le financement d'Hydro-Québec, du Conseil de Recherche en Sciences Naturelles et en Génie du Canada (CRSNG) et de CANMET.*

---

## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

---

- [1] SWAMY R.N., AL-ASALI M.M., Expansion of concrete due to ASR, *ACI Materials Journal*, **85**, 1988, pp. 33-40.
- [2] MONETTE L., GARDNER J., GRATTAN-BELLEW P.E., Structural effects of the alkali-silica reaction on non-loaded and loaded reinforced concrete beams, *Compte-rendu de la 11<sup>e</sup> Conférence Internationale sur la RAG*, Québec, Canada, juin 2000, pp. 999-1008.
- [3] BALLIVY G., KHAYAT K., GRAVEL C., HOULE D., Influence of reinforcement steel on the expansion of concrete affected by AAR, *Compte-rendu de la 11<sup>e</sup> Conf. int. sur les RAG*, Québec (Canada), 2000, pp. 919-928.



- [4] STANTON T.E., Influence of cement and aggregate on concrete expansion, *Engineering news record* **1**, **1940**, pp.59-61.
- [5] HOBBS D.W., *Alkali-silica reaction in concrete*, Thomas Thelford, Londres (G-B), **1988**, 183 pages.
- [6] LE ROUX A., GUÉDON J.S., THIÉBAUT J., WACKENHEIM C., *Pétrographie appliquée à l'alcali-réaction*, Collection Études et recherches des Laboratoires des Ponts et Chaussées – série Ouvrages d'art – OA26, Paris (France), **1999**, 98 pages.
- [7] FOURNIER B., BÉRUBÉ M.A., Alkali-aggregate reaction in concrete : a review of basic concepts and engineering implications, *Revue canadienne de génie civil*, **27**, **2000**, pp. 167-191.
- [8] RIVARD P., OLLIVIER J.P., BALLIVY G., Characterization of the ASR-reaction rim : Application to the Potsdam sandstone, *Cement and Concrete Research*, **32**, **2002**, pp. 1259-1267.
- [9] NATESAIYER K., HOVER K.C., *In situ* identification of ASR products in concrete, *Cement and Concrete Research*, **18**, **1988**, pp. 455-463.
- [10] ST JOHN D.A., POOLE A.W., SIMS I., *Concrete petrography*, A handbook of investigative techniques, Arnold Ed. London, Great Britain, **1998**.
- [11] MCCONNELL D., MIELENZ R.C., HOLLAND W.Y., GREENE K.T., *Petrology of concrete affected by cement-aggregate reaction*, in *Application of geology to engineering practice*, The Berkeley volume, ed. by S. Paige, The Geological Society of America, **1950**, pp. 225-250.
- [12] IDORN G.M., *Durability of concrete structures in Denmark – A study of field behaviour and microscopic features*, Ph.D Thesis, Technical University of Denmark, Copenhagen (Den), **1967**, 208 pages.
- [13] DEPUY G.W., Petrographic investigations of concrete and concrete aggregates at the Bureau of reclamation, *Proc. of Symp. on petrography applied to concrete and concrete aggregates*, St-Louis (États-Unis), June 1989, ASTM STP-1061, **1990**, pp. 32-46.
- [14] RICHART F.E., BRANDTZAEG A., BROWN R.L., *Bulletin*, **185**, **1928**, Engineering experiment station, University of Illinois (États-Unis).
- [15] HSU T.T.C., SLATE F.O., STURMAN G.M., WINTER G., Microcracking of plain concrete and the shape of the stress-strain curve, *Journal of the ACT*, **60**, **1963**, pp. 209-224.
- [16] SLATE F.O., OLSEFKI S., X-rays for study of internal structure and microcracking in concrete, *Journal of ACI*, **60**, **1963**, pp. 575-587.
- [17] NAJJAR W.S., ADERHOLD H.C., HOVER K.C., The application of neutron radiography to study of microcracking in concrete, *Cement, Concrete and Aggregate*, **8**, **1986**, pp. 103-109.
- [18] ANDERSON P.E., PETERSON B.H., Drilling of concrete cores and preparation of thin sections, *RILEM bulletin*, **11**, **1961**, pp. 94-106.
- [19] BROOMS B.B., Technique for investigation of internal cracks in reinforced concrete member, *Journal of the ACI*, **62**, **1965**, pp. 35-44.
- [20] RIVARD P., FOURNIER B., BALLIVY G., Quantitative petrographic technique for concrete damage due to ASR : Experimental and application, *Cement, Concrete, and Aggregates*, **22**, **2000**, pp. 63-72.
- [21] OLLIVIER J.P., A non destructive procedure to observe microcracks in concrete with scanning electron microscopy, *Cement and Concrete Research*, **15**, **1985**, pp. 1055-1060.
- [22] NISHIYAMA T., KUSUDA H., Identification of pore spaces and microcracks using fluorescent resins, *Int. Journ. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech.*, **31**, **1994**, pp. 369-375.
- [23] MACQUAIRE B., GRILLON F., Détection automatique des fissures dans les matériaux composites, *La revue de Métallurgie-CIT*, février **1994**, pp. 317-322.
- [24] PETROV I., SCHLEGEL E., Application of automatic image analysis for the investigation of autoclaved concrete structure, *Cement and Concrete Research*, **24**, **1994**, pp. 830-840.
- [25] ALHASSANI Y., BASCOUL A., RINGOT E., Microcrack study of cement-based materials by means of image analysis, *Proceeding of Material Research Society Symposium*, vol. **370**, **1995**, pp. 43-48.
- [26] DARWIN D., ABOU-ZEID M.N., KETCHAM K.W., Automated crack identification for cement paste, *Cement and Concrete Research*, **25**, **1995**, pp. 605-616.
- [27] SALOMON M., PANETIER J.L., Quantification du degré d'avancement de l'alcali-réaction dans les bétons et la néofissuration associée, *Proc. of 3<sup>rd</sup> Int. Conf. on concrete durability*, Nice (France), **1994**, pp. 383-401.
- [28] AMMOUCHE A., BREYSSE D., HORNAIN H., DIRDY O., MARCHAND J., A new image analysis technique for the quantification assessment of microcracks in cement-based materials, *Cement and Concrete Research*, **30**, **2000**, pp. 25-35.

- [29] BRITISH CEMENT ASSOCIATION, *The diagnosis of alkali-silica reaction*, report of a working party, BCA, Wexham Springs (UK), **1993**.
- [30] MARTINEAU F., GUÉDON-DUBIED J.S., LARIVE C., Evaluation of the relationship between swelling, cracking, development of gels, *Proc. of 10<sup>th</sup> Int. Conf. on AAR*, Melbourne (Australia), **1996**, pp. 798-805.
- [31] LENDZER D., LUDWIG U., Alkali-Aggregate Reaction with opaline sandstone from Schleswig-Holstein, *Proc. of 4<sup>th</sup> Int. Conf. on AAR*, Purdue University, West Lafayette, Indiana (États-Unis), **1978**, pp. 11-34.
- [32] GRATTAN-BELLEW P.E., Laboratory evaluation of alkali-silica reaction in concrete from Saunders Generating station, *ACI Material Journal*, **92**, **1995**, pp. 1-9.
- [33] GRATTAN-BELLEW P.E., DANAY A., Comparison of laboratory and field evaluation of alkali-silica reaction in large dam, *Proc. of Int. Conf. on Concrete AAR in Hydroelectric Plants and Dams*, CEA in association with Canadian National Committee of the ICOLD, Fredericton (N-B), Sept. 28<sup>th</sup> to Oct. 2<sup>nd</sup> **1992**, 23 pages.
- [34] SIMS I., HUNT B., MIGLIO B., Quantifying microscopical examinations of concrete for AAR and other durability aspects, *American Concrete Institute*, SP **131-14**, **1992**, pp. 267-287.
- [35] RIVARD P., *Quantification de l'endommagement des bétons atteints de RAS par analyse d'images*, Mémoire de maîtrise, Université de Sherbrooke, **1998**, 166 pages.
- [36] DUNBAR P.A., GRATTAN-BELLEW P.E., Results of damage rating evaluation of condition of concrete from a number of structures affected by AAR, *Proc. of CANMET/ACI Int. workshop on AAR in concrete*, Darmouth, Nova Scotia (Canada), **1995**, pp. 257-265.
- [37] DUNBAR P.A., MUKHERJEE P.K., BLESZYNSKI R., THOMAS M.D.A., *A comparison of damage rating index with long-term expansion of concrete prisms due to alkali-silica reaction*, Compte-rendu de la 10<sup>e</sup> Conférence internationale sur la RAG, Melbourne (Australie), **1996**, pp. 324-331.
- [38] SHRIMER F., *Application and use of Damage Rating Index in assessment of AAR-affected concrete*, – selected case studies, Compte-rendu de la 11<sup>e</sup> Conférence Internationale sur la RAG, Québec (Canada), **2000**, pp. 899-908.
- [39] GILKS P., MAY T., CURTIS D., *A review and management of AAR at Mactaquac generating station*, Comptes-rendus du congrès annuel de l'Association Canadienne des Barrages, Fredericton (Canada), October **2001**, pp. 167-177.
- [40] CALVALCANTI A.J.C.T., SILVEIRA J.F.A., DESGASPARE J.C., *AAR management at Paulo Afonso power plant – Brazil*, Comptes-rendus de la 11<sup>e</sup> Conférence Internationale sur la RAG, Québec (Canada), **2000**, pp. 1263-1272.
- [41] BERARD J., LAPIERRE N., Réactivité aux alcalis du grès de Potsdam dans les bétons, *Revue Canadienne de Génie Civil*, **4**, **1977**, pp. 332-344.
- [42] BÉRUBÉ M.A., DURAND B., VÉZINA D., FOURNIER B., Alkali-aggregate reactivity in Quebec (Canada), *Revue canadienne de génie civil*, **27**, **2000**, pp. 226-245.
- [43] RIVARD P., FOURNIER B., BALLIVY G., The Damage Rating Index method for ASR affected concrete : a critical review of petrographic features of deterioration and evaluation criteria, *Cement, Concrete and Aggregates*, **24**, **2002**, pp. 80-90.
- [44] GALLIAS J.L., *Comparison of damaging criteria for testing aggregates by autoclaving treatment*, Comptes-rendus de la 11<sup>e</sup> Conférence Internationale sur la RAG, Québec, Canada, juin **2000**, pp. 949-958.
- [45] KOJIMA T., HAYASHI H., KAWAMURA M., KUZUME K., *Maintenance of highway affected by AAR*, Compte-rendu de la 11<sup>e</sup> Conférence Internationale sur la RAG, Québec, Canada, juin **2000**, pp. 1159-1166.
- [46] ONO K., TAGUCHI M., *Long-term behavior of AAR bridge pier and the internal deterioration*, Compte-rendu de la 11<sup>e</sup> Conférence Internationale sur les RAG, Québec, Canada, juin **2000**, pp. 1167-1174.
- [47] BOIS A.P., *Auscultation des ouvrages en rocher ou en béton à l'aide du cylindre instrumenté de l'Université de Sherbrooke (CIUS)*, Thèse de doctorat, Université de Sherbrooke, **1995**, 382 pages.
- [48] ST JOHN D. A., The use of large-area thin sectioning in the petrographic examination of concrete, *Proc. of Symp. on petrography applied to concrete and concrete aggregates*, St-Louis (États-Unis), June **1989**, ASTM STP-1061, **1990**, pp. 55-70.
- [49] MICHEL B., THIÉBAUT J., WACKENHEIM C., Intérêt de la minéralogie des granulats dans la connaissance des risques de l'alcali-réaction, *Bulletin of engineering geology and the environment*, **62**, **2003**, pp. 145-153.