

---

Nom : RIVARD

Prénom : Patrice

Titre de la thèse : Contribution à l'étude de l'expansion résiduelle des bétons atteints de réactivité alcalis-silice, 242 pages

Thèse en cotutelle, génie civil, soutenue à Sherbrooke (Canada), 2002

---

## RÉSUMÉ

L'objectif de cette thèse est d'apporter des éléments nouveaux contribuant au développement d'une méthode de prédiction de l'expansion résiduelle du béton atteint de réactivité alcalis-silice (RAS). L'originalité de ce travail réside principalement dans l'apport de résultats expérimentaux sur la variation de la concentration en alcalis en solution dans divers types de bétons (de laboratoire et de chantier) atteints ou non de RAS et conservés à 38°C et >95% H.R. Les principales conclusions sont les suivantes: 1) La concentration en alcalis de la solution interstitielle dans le temps. Surtout en raison du lessivage des alcalis, 2) De 20 à 30% des alcalis totaux seraient "non récupérables" par la méthode d'extraction de la solution à haute pression, 3) L'alcalinité de la solution interstitielle des bétons est plus faible que celle extraite des pâtes de ciment pures de même rapport E/C. L'écart est attribué à la sorption des alcalis sur les particules de granulats, 4) Il semble plus réaliste de considérer le seuil critique stoppant la RAS en terme de concentration qu'en terme de teneur en alcalis. Cette concentration-seuil est plus élevée dans un mélange contenant initialement plus d'alcalis, 5) L'alcalinité de la solution interstitielle extraite d'éprouvettes de béton ayant subi un cycle de séchage/réhumidification chute de 34% à 61% comparativement à des éprouvettes conservées continuellement en air humide.

---

Mots clés: réaction alcalis-silice, solution interstitielle, expansion, béton, lessivage, séchage, centrale de Beauharnois, grès de Potsdam, calcaire Spratt, auréole de réaction, sorption, endommagement

---

JURY

5 septembre 2002 à l'Université de Sherbrooke

Président : Pr. M.A. Bérubé

Membres : Pr. G. Ballivy  
Pr. J.L. Gallias  
Pr. J.P. Ollivier  
Pr. A. Tagnit-Hamou

Thèse préparée conjointement au Laboratoire Matériaux et Durabilité des Constructions – INSA-UPS et au Laboratoire de mécanique des roches et géologie appliquée de l'Université de Shebrooke

Dépôt à la bibliothèque en 4 exemplaires

## Résumé

L'objectif de cette thèse est d'apporter des éléments nouveaux contribuant au développement d'une méthode de prédiction de l'expansion résiduelle du béton atteint de réactivité alcalis-silice (RAS). L'originalité de ce travail réside principalement dans l'apport de résultats expérimentaux sur la variation de la concentration en alcalis en solution dans divers types de bétons atteints ou non de RAS.

Quatre mélanges réactifs et un mélange témoin ont été étudiés. Trois granulats canadiens ont été utilisés: le calcaire Spratt et le grès de Potsdam (réactifs) et le calcaire Limeridge (non réactif). Des éprouvettes de béton ont été confectionnées à partir de ces mélanges enrichis en alcalis et elles ont été entreposées à 38°C en air humide (>90% H.R.) afin d'accélérer la réaction selon la norme canadienne CSA A23.2-14A. Des carottes de forage provenant d'un barrage hydroélectrique atteint de RAS ont également été conservées dans ces conditions. Des mesures d'allongement et de masse ont été prises à intervalle régulier.

Plusieurs études ont été réalisées au cours de l'expansion de ces éprouvettes: examen pétrographique quantitatif, analyse de la solution interstitielle extraite des bétons, dissolution de la silice réactive en solution alcaline concentrée, caractérisation de l'auréole de réaction. Les principales conclusions sont les suivantes:

- Une relation existe entre l'allongement des éprouvettes des mélanges réactifs et leur gain de masse. Le niveau d'endommagement associé à la RAS (tel que mesuré par le *Damage Rating Index*) augmente avec le niveau d'expansion atteint par les éprouvettes.
- La concentration en alcalis de la solution interstitielle des bétons soumis à l'essai accéléré CSA A23.2-14A décroît dans le temps. Une très large part de cette diminution est attribuable au lessivage des alcalis qui se produit dans des conditions d'humidité extrême. Ce dernier point est d'ailleurs traité en détail dans cette thèse.
- Selon le bilan en alcalis réalisé au cours de cette thèse, pas plus de 30% des alcalis totaux seraient en solution après 12 semaines. Toutefois, entre 20% et 30% des alcalis totaux seraient "non récupérables" par la méthode d'extraction de la solution à haute pression. Ces alcalis seraient en quelque sorte sorbés sur les particules de granulats. Cette proportion d'alcalis sorbés demeure plus ou moins constante dans le temps et semble relativement indépendante de la composition et de la réactivité du granulat.

- L'alcalinité de la solution interstitielle extraite des bétons est plus faible que celle extraite des pâtes de ciment pures de même rapport E/C. L'écart est attribué à la sorption des alcalis sur les particules de granulats, absentes des échantillons de pâtes pures. Les ions alcalins semblent donc migrer très tôt vers les particules de granulats pour s'y concentrer.
- Il semble plus réaliste de considérer le seuil critique stoppant la RAS en terme de concentration qu'en terme de teneur en alcalis. Les résultats obtenus démontrent que la concentration-seuil varie en fonction du granulat testé et du type de mélange testé. Cette concentration-seuil est plus élevée dans un mélange contenant initialement plus d'alcalis.
- L'alcalinité de la solution interstitielle extraite d'éprouvettes de béton ayant subi un cycle de séchage/réhumidification chute de 34% à 61% comparativement à des éprouvettes conservées continuellement en air humide. Le séchage du béton réduit donc la concentration en alcalis dans la solution interstitielle.
- Une relation directe existe entre le taux de mise en solution du silicium et la température lorsque des granulats de grès réactif sont plongés dans une solution de soude. La quantité de silicium (en solution ou dans les gels) est principalement gouvernée par l'alcalinité initiale de la solution interstitielle, et par conséquent du pH de la solution. Les essais de dissolution ont aussi montré que des granulats extraits de carottes de béton dont l'expansion dans la soude avait plafonné continuent de se dissoudre lorsqu'ils sont plongés dans une nouvelle solution de NaOH.
- L'auréole de réaction observée autour de particules de grès réactif est principalement constituée de silice précipitée. Les alcalis et le calcium sont détectés dans les particules de granulat après seulement 14 jours en cure humide à 23°C et leur teneur croît avec le temps. Les teneurs maximales à l'intérieur des particules sont observées aux environs de 250  $\mu\text{m}$  de l'interface pâte-granulat.

## Abstract

The aim of this thesis is to bring about some new elements that may contribute to the development of a method to predict the future expansion of structures affected by alkali-silica reaction (ASR). The main contribution of this work was to report experimental results on the variations of the alkali concentration in the pore solution of various concrete specimens affected or not by ASR.

Five mixtures (four reactive and one non-reactive) were tested. Three Canadian aggregates were used: the Spratt limestone and the Potsdam sandstone (reactive), and the Limeridge limestone (non-reactive). Several concrete prisms were made from these alkali-enriched mixtures and were stored at 38°C in humid air (>90% H.R.) in order to accelerate the reaction according to the Canadian standard CSA A23.2-14A. Some cores drilled from a large hydroelectric dam suffering from ASR were also kept in these conditions. Expansion and mass measurements were taken at regular interval on these specimens.

Several investigations have been performed through the tested specimen expansion: quantitative petrographic examination, analysis of the extracted pore solution, dissolution of the reactive silica in NaOH solution, characterization of the reaction rim. The main conclusions are the following:

- A relation is shown between the expansion of reactive prisms and their water gain. The degree of damage associated with ASR (as determined by the Damage Rating Index) increases with the expansion level reached by the prisms.
- The alkali concentration of the pore solution of concrete submitted to the accelerated test CSA A23.2-14A decreases with time. A large part of this decrease is due to the leaching of alkali occurring in such high-moisture environment. This phenomenon is largely discussed in this thesis.
- According to an alkali mass balance performed in this thesis, no more than 30% of the total alkalis would be in solution after 12 weeks. Moreover, between 20% and 30% of the total alkalis would be "unrecoverable" by high-pressure extraction method. These alkalis are though to be sorbed on aggregate particles. This proportion of sorbed alkalis remains more or less constant with time and seems to be relatively independent from the composition and reactivity of the aggregates.

- The alkalinity of the pore solution extracted from concrete is lower than the alkalinity of the pore solution extracted from cement paste specimens with the same W/C ratio. The difference seems to be due to the alkali sorption on the aggregate particles (coarse and fine), which are only found in concrete specimens.
- It seems more realistic to consider the alkali critical limit that would stop ASR in terms of concentration rather than in terms of alkali content. The results show that the critical concentration varies according to both the tested aggregate and the tested mixture. This critical concentration is higher with a concrete mixture that initially contains more alkalis.
- The results obtained from this thesis confirmed that a certain part of the alkali ions in concrete pore solution that had become fixed by drying are not subsequently extracted after re-wetting: the alkali concentration  $[Na+K]$  was reduced from 34% to 61% by the drying and re-wetting treatments.
- A direct correlation is shown between the dissolution rate of silica and the temperature when reactive sandstone aggregates are kept in concentrated NaOH solution. The amount of silica (in solution or in ASR gels) is mainly governed by the initial alkalinity of the pore solution, and therefore by the solution pH. Aggregates retrieved from concrete cores, which are not expansive anymore after being submitted to NaOH expansion test, still releasing silica when they are soaked back in NaOH solution.
- The reaction rim surrounding reactive sandstone particles is mainly composed of precipitated silica. Alkalis and calcium were detected in aggregate particles after only 14 days in humid curing at 23°C, as their concentration increases with time. Maximum content inside particles were found at about 250  $\mu m$  from the cement paste/aggregate interface.