

21^e édition des Journées scientifiques
du Regroupement francophone pour la recherche et la formation sur le béton
(RF)²B

Polytechnique Montréal, Montréal, Canada
5 et 6 juillet 2023

DÉTERMINATION DE LA CONDITION DE L'ÉTAT DE PONTS VIEILLISSANTS EN BÉTON ARMÉ : DE L'ÉVALUATION VISUELLE À L'ÉVALUATION MICROSCOPIQUE

L. Kristufek^A, L. Sanchez^A, B. Martin-Perez^A, M. Noel^A
A Department of Civil Engineering, University of Ottawa, Ottawa, Canada

RÉSUMÉ: Dans les villes canadiennes, comme Montréal, les structures en béton armé sont soumises à un climat rigoureux. Dans de nombreuses régions, les granulats sont sensibles à la réaction alcali-granulat (RAG) qui provoque un gonflement interne entraînant une réduction des propriétés mécaniques, de la rigidité et de la durabilité. L'évaluation de l'état des structures vieillies est complexe en raison des multiples causes de dommages qui se produisent souvent simultanément.

Cet ouvrage traite du processus d'évaluation de l'état du béton dans différents éléments structurels, depuis les essais visuels et non destructifs sur la structure jusqu'aux essais en laboratoire sur des carottes, y compris les essais mécaniques et microscopiques.

1. INTRODUCTION

La construction en béton armé est fréquente à Montréal, mais au fur et à mesure que les structures vieillissent, on peut observer une détérioration. Les problèmes les plus fréquents sont les dommages causés par le gel et le dégel au béton extérieur et la corrosion de l'armature due à l'utilisation des sels de déglacage en hiver, qui peut entraîner un écaillage. La réaction alcali-granulat est également fréquente dans de nombreuses structures au Canada, surtout à l'est, entraînant une expansion interne qui provoque de fortes réductions des propriétés mécaniques telles que la résistance à la compression, la résistance à la traction et le module d'élasticité, même à de faibles niveaux d'expansion induite (Sanchez et al., 2017). Alors que les mécanismes peuvent être présents dans le même béton, à différent niveau d'endommagement à travers de la structure, il est requis de déterminer la contribution de chaque envers l'endommagement afin de planifier l'entretien.

La période entre les années 1960, lorsque les sels de déglacages de voirie ont commencé à être utilisés, et les années 1980, lorsque les réducteurs d'eau à haut rendement ont été introduits (Lei et al., 2022), est déterminante pour les méthodes de construction du béton et les problèmes de durabilité du béton dans la région de Montréal. L'établissement de l'hydroélectricité dans les années 1950 a mené à l'adoption du chauffage électrique dans de nombreuses maisons (Sandwell, 2016). Cela signifie que les cendres de bois et de charbon n'étaient plus disponibles pour les routes pendant l'hiver et que le sel gemme était utilisé à leur place, ce qui, pendant plusieurs décennies, a entraîné une corrosion généralisée des armatures (Mermigas, 2018). Au cours de la même période, d'autres problèmes de détérioration ont été reconnus et des solutions ont été élaborées, notamment l'entraînement d'air pour lutter contre le gel-dégel ainsi que des

efforts d'atténuation et de prévention de la réaction alcaline des agrégats telle qu'elle se produisait au Canada (Rogers et al., 2000; Swenson & Legget, 1960).

Aujourd'hui on a amélioré la durabilité de notre béton. Le gel-dégel est moins problématique en raison des spécifications relatives à l'air entraîné dans les structures extérieures. De même, la perméabilité plus faible des nouvelles structures a permis de ralentir le temps d'initiation de la corrosion, ce qui retardera le développement des fissures et de l'écaillage observés dans de nombreuses structures plus anciennes. Actuellement, les essais effectués dans les carrières servent à identifier les granulats susceptibles de provoquer un gonflement interne dû à la réaction alcali-granulat dans les structures (CSA A23.2-14A, n.d.; CSA A23.2-25A, n.d.). Lorsque des granulats réactifs sont utilisés, des mesures d'atténuation peuvent être prises (CSA A23.2-27A, n.d.). Malgré ce progrès parmi la communauté de chercheurs a progressé dans l'identification et le traitement du gel-dégel, de la corrosion des armatures et de la réaction alcali-granulat, mais les structures existantes continuent d'être confrontées à ces problèmes.

En raison de la variété des détériorations qui se produisent souvent ensemble dans les structures en béton armé, on a besoin de diagnostiquer avec précision à la fois la cause et l'étendue de la détérioration d'une structure. Dans les structures présentant des signes de détérioration, il est important d'adopter une approche qui combine les outils d'évaluation disponibles (le multi-level assessment), y compris des évaluations visuelles et non destructives, associées à l'extraction de carottes pour l'évaluation microscopique et mécanique. Cette présentation se concentrera sur l'évaluation à plusieurs niveaux des carottes de béton.

Ce travail se concentre sur le diagnostic de deux éléments en béton armé dans une structure vieille de 60 ans à Montréal, qui sont notamment affectés par or principalement par la réaction alcali-granulat.

2. MÉTHODES

Les éléments ont fait l'objet d'une évaluation visuelle conventionnelle, accompagnée d'un indice de fissuration qui constitue un outil d'évaluation plus quantitatif. De grandes fissures (> 0,18 mm) (ACI 224R-01, 2001) ont été observées, indiquant la nécessité d'une évaluation plus approfondie. Des essais non destructifs ont été effectués, notamment au marteau de Schmidt, à la vitesse d'impulsion ultrasonique et à la résistivité de surface. Des tests de corrosion limités (potentiel de demi-cellule et densité de courant de corrosion) ont également été effectués.

Des carottes de béton ont été extraites pour être testées à l'aide de techniques microscopiques (Damage rating index - DRI) et d'essais mécaniques (résistance à la compression, stiffness-damage test – SDT).

2.1 Indice de fissuration

L'indice de fissuration (the cracking index – CI) a été créé par l'Institut français des sciences et technologies des transports (IFSTTAR) pour évaluer les structures existantes qui sont notamment affectées par or principalement par la réaction alcali-granulat (Godart et al., 1992). On peut utiliser cette technique pour mieux comprendre combien d'expansion c'est passé, peut-être à cause de la réaction alcali-granulat. Alors, la fissuration à l'extérieur d'une structure n'est pas la même que l'intérieure à cause des choses comme l'environnement, l'armature du béton, etc. (NRC, 2013).

L'indice de fissuration est réalisé en traçant des lignes sur une structure, le plus souvent un carré divisé par deux lignes diagonales. Le nombre et la largeur des fissures qui traversent ces lignes sont ensuite comptés et normalisés à une distance de 1 m (eqn. 1). Les dimensions minimales suggérées sont de 0,5 m x 0,5 m (Godart et al., 1992) comme le montre la figure 1.

$$\text{Indice de fissuration} = \frac{\sum \text{Largeur de fissures [mm]}}{\text{longueur de base [m]}} \quad (1)$$

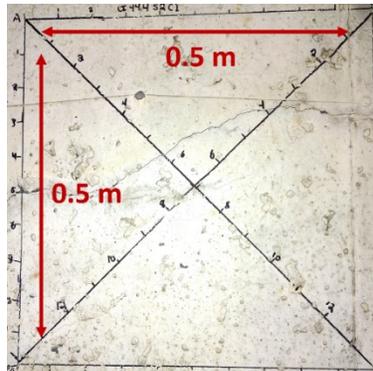


Figure 1. Exemple Indice de fissuration

Une évaluation plus approfondie du béton est d'abord indiquée lorsque l'indice de fissuration se situe entre 0,4 mm/m et 0,6 mm/m dans le béton non contraint (RILEM, 2013) avec un critère de 0,5 mm/m sélectionné par (Fournier et al., 2010) avec la recommandation supplémentaire que les fissures dépassant 0,15 mm de largeur déclenchent une enquête supplémentaire, en particulier pour le béton précontraint (Institution of Structural Engineers (ISE), 1992). Pour l'investigation des structures le tableau 1 peut être suivi.

Tableau 1. Action suggérée pour la largeur différent des fissures dans béton renforcé (adapte de (RILEM, 2013))

Largeur de fissure [mm]	Description et action suggérée
< 0,1	Fin (habituellement présent)
0,1 – 0,3	Normale à limite normale pour le béton armé
0,3 – 0,5	Grand (dépassement de la limite)
0,5 – 1,0	Modérément large (enregistrer tout)
2,0 – 5,0	Grande (indique à l'ingénieur)
> 5,0 – 10,0	Très grande (indique à l'ingénieur)

* Pour le béton précontraint, une échelle plus conservatrice doit être utilisée

2.2 Damage Rating Index

Le 'damage rating index' (DRI) est une technique d'analyse microscopique développée pour évaluer l'expansion du béton affecté par le RAG. Les carottes sont coupées, polies et des grilles de 1 cm² sont dessinées sur leur surface. Les carottes sont ensuite inspectées à l'aide d'un stéréomicroscope (en utilisant grossissement 15-16x). Un minimum de 200 cm² par zone d'intérêt est suggéré pour comprendre le comportement des fissures dans une zone affectée d'une structure en béton et peut être réalisé par l'examen de plusieurs carottes. Le nombre de DRI est ensuite normalisé à 100 cm² pour permettre une comparaison avec la littérature et d'autres zones. Les caractéristiques indiquant aux endommagements tels que les fissures sont prises en compte et les facteurs de pondération utilisés sont présentés dans le tableau 2, des exemples de caractéristiques clés sont présentés dans la figure 2.

Tableau 2. Weighting factors used for Damage Rating Index (DRI) technique (Sanchez et al., 2015)

Caractéristiques des dommages		Coefficients de pondération
Fissure dans un granulat (Crack in aggregate)	CCA	0,25
Fissure ouverte dans un granulat (Open crack in aggregate)	OCA	2
Fissure avec produit de réaction dans un granulat (Open crack in aggregate with gel)	OCAG	2
Granulat déchaussé (Coarse aggregate debonded)	CAD	3
Fissure dans la pâte de ciment (Crack in cement paste)	CCP	3
Fissure avec produit de réaction dans la pâte de ciment (Crack in cement paste with gel)	CCPG	3
Particules de granulat désagrégés/corrodés (Disaggregate/corroded aggregate particle)	DAP	2

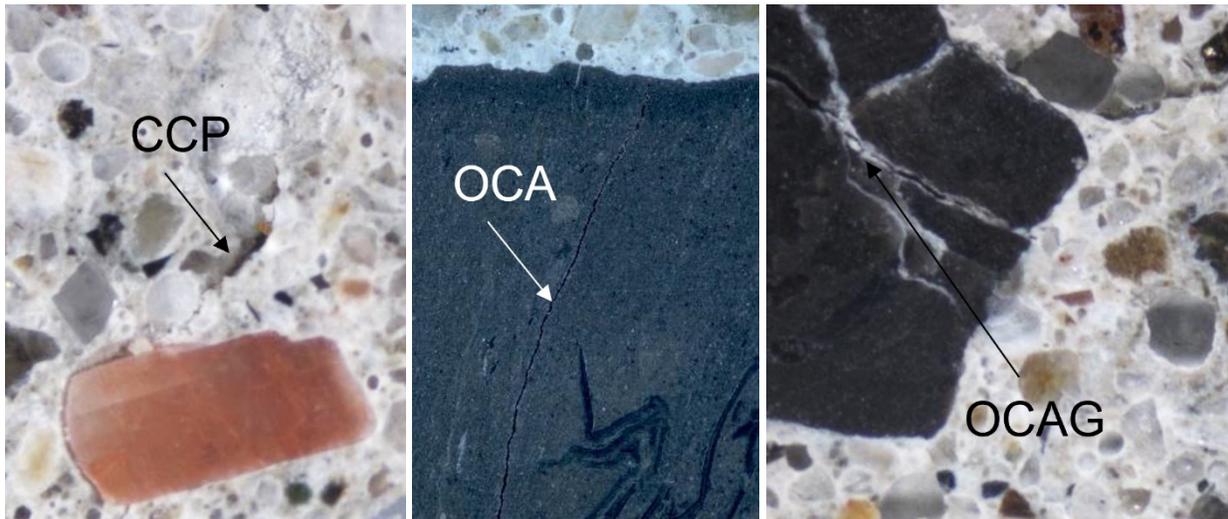


Figure 2. Exemples de différentes caractéristiques prises en compte dans DRI

3. DISCUSSION

L'indice de fissuration a été réalisé sur une structure en béton armé construite dans les années 1960. Des mécanismes mixtes sont suspectés avec des signes de corrosion de l'armature. Des carottes ont été extraites et une investigation microscopique (DRI) a été réalisée. Ce nous donne les différences entre l'état externe (indice de fissuration) et l'état interne (DRI).

Quelques sections de la structure étudiée ont fait l'objet de réparations externes. Malgré les réparations, les valeurs de l'indice de fissuration étaient souvent supérieures à 0,5 mm/m, ce qui indique la nécessité d'une étude plus approfondie. Par exemple, la figure 3 montre les résultats de la DRI pour une carotte de béton. L'indice de fissuration sur la surface d'où il a été extrait était de 3, avec des largeurs de fissure comprises entre 0,1 et 0,9 mm. Le béton original (ou intérieur) présent plusieurs fissures avec de produits de réaction, soit dans le granulat soit dans la pâte de ciment. Cela indique un fort degré d'expansion à cause de la réaction alcali-granulat. Par contre, le béton utilisé pour la réparation du béton original ne présente pas de fissures avec de produits de réaction ce qui n'indique pas la présence de la réaction alcali-

granulat. Pourtant des fissures assez importantes ont été trouvées dans le béton de réparation, ce qui doit être causé par le gonflement du béton original.

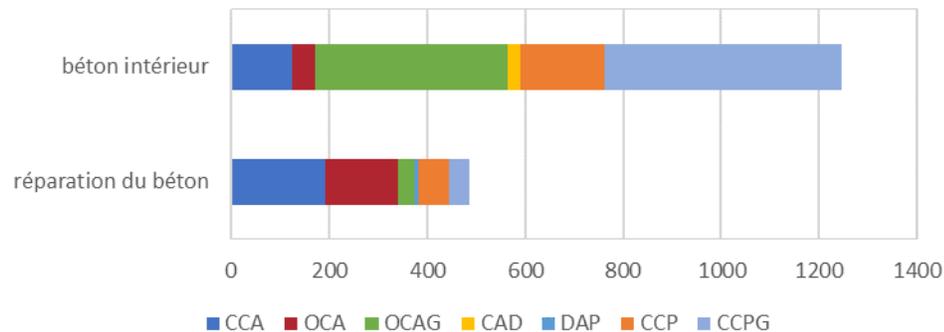


Figure 3. Résultat pour DRI sur un carotte de béton (original en haut et la réparation en bas)

5. RÉFÉRENCES

- ACI 224R-01. (2001). *Control of Cracking in Concrete Structures*.
- CSA A23.2-14A. (n.d.). *Potential expansivity of aggregates (procedure for length change due to alkali-aggregate reaction in concrete prisms at 38 ° C)*.
- CSA A23.2-25A. (n.d.). *Test method for detection of alkali-silica reactive aggregate by accelerated expansion of mortar bars*.
- CSA A23.2-27A. (n.d.). *Standard practice to identify degree of alkali-reactivity of aggregates and to identify measures to avoid deleterious expansion in concrete*.
- Godart, B., Fasseu, P., & Michel, M. (1992). Diagnosis and monitoring of concrete bridges damaged by AAR in Northern France. *The Ninth International Conference On Alkali-Aggregate Reaction In Concrete*, 368–375.
- Institution of Structural Engineers (ISE). (1992). Structural Effects of Alkali-Silica Reaction – Technical Guidance Appraisal of Existing Structures. In *Institution of Structural Engineers* (p. 45).
- Lei, L., Hirata, T., & Plank, J. (2022). 40 years of PCE superplasticizers - History, current state-of-the-art and an outlook. *Cement and Concrete Research*, 157. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2022.106826>
- Mermigas, K. (2018). Evolution of Bridge Practices in Ontario, Canada. *2018 Conference of the Transportation Association of Canada*, 1–18.
- NRC. (2013). *In Situ Monitoring of Alkali-silica reaction (ASR) affected concrete: a study on crack indexing and damage rating index to assess the severity of ASR and to monitor progression. Technical report. ML13108A047. US-Nuclear Regulatory Commission, Position paper*.
- RILEM. (2013). *Guide to Diagnosis and Appraisal of AAR Damage to Concrete in Structures* (B. Godart, M. de Rooij, & J. G. M. Wood, Eds.). Springer Netherlands.
- Rogers, Grattan-Bellew, P. E., Hooton, R. D., Ryell, J., & Thomas, M. D. A. (2000). Alkali-aggregate reactions in Ontario. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 27(2), 446–460.
- Sanchez, L. F. M., Fournier, B., Jolin, M., & Duchesne, J. (2015). Reliable quantification of AAR damage through assessment of the Damage Rating Index (DRI). *Cement and Concrete Research*, 67, 74–92. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2014.08.002>
- Sanchez, L. F. M., Fournier, B., Jolin, M., Mitchell, D., & Bastien, J. (2017). Overall assessment of Alkali-Aggregate Reaction (AAR) in concretes presenting different strengths and incorporating a wide range of reactive aggregate types and natures. *Cement and Concrete Research*, 93, 17–31. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2016.12.001>
- Sandwell, R. W. (2016). *The History of Power, Fuel, and Energy from 1600*.
- Swenson, E. G., & Legget, R. F. (1960). Kingston study of cement-aggregate reaction. *Canadian Consulting Engineer*, 2(8), 38–46.