

Synthèse sur le diagnostic des ouvrages hydrauliques en béton à Hydro-Québec

Matthieu Argouges¹, Brigitte Naud¹, Patrice Côté¹

¹Hydro-Québec, Sécurité des barrages et infrastructures, Direction principale Expertise et Soutien Technique

RESUME Cet article présente une synthèse des activités de diagnostic des ouvrages hydrauliques en béton à Hydro-Québec. Après une brève présentation d'Hydro-Québec, de ses ouvrages hydrauliques, des activités liées au diagnostic, soit l'inspection, l'auscultation, l'instrumentation, les expertises et la modélisation, sont présentées.

Mots-clefs ouvrages hydrauliques, auscultation, instrumentation, expertise, modélisation

I. DESCRIPTION D'HYDRO-QUÉBEC

Hydro-Québec est une société d'état québécoise, composée d'environ 20000 employés et fondée en 1944, qui produit, transporte et distribue de l'électricité à plus de 95 % de sources renouvelables, à travers tout le Québec et l'Amérique du Nord. Grâce à sa puissance installée de plus de 37 TW, Hydro-Québec a fourni plus de 216 TWh d'énergie en 2022. Sa principale source d'énergie est l'hydro-électricité, composée de 63 centrales hydro-électriques, dont la plus puissante peut fournir plus de 5600 MW, près de 700 barrages dont une centaine en béton et de 28 grands réservoirs.

Compte tenu que les centres de consommation, le long de la vallée du Saint-Laurent sont situés à plus de 1000 km des principaux lieux de production, Hydro-Québec exploite le plus vaste réseau de transport de l'Amérique du Nord. Cela représente plus de 34 000 km de lignes à haute et très haute tension (69 à 765 kV) et un réseau de distribution de moyenne et basse tension de plus de 227 000 km.

II. PRÉSENTATION DES OUVRAGES HYDRAULIQUES D'HYDRO-QUÉBEC

Le parc de production hydroélectrique est composé de 99 aménagements qui regroupent les barrages, les ouvrages régulateurs (évacuateurs, crêtes déversantes, etc.), les réservoirs, les centrales hydroélectriques et les infrastructures adjacentes (ponts, routes, parois rocheuses, etc.). Les barrages sont divisés en cinq générations de constructions. Le plus ancien est le barrage de la Montmorency et date de 1885, alors que l'aménagement Romaine-4 a été mis en service en octobre 2022. La plupart des barrages d'Hydro-Québec sont en remblai et environ une centaine sont en béton. Les deux barrages en béton les plus connus sont le barrage de Beauharnois, proche de Montréal, construit en trois phases entre 1932 et 1962, et le barrage Daniel-Johnson, de l'aménagement Manic-5, dans la région Manicouagan (Figure 1).



Figure 1 - Barrage de Beauharnois (1932-1962) et Barrage Daniel-Johnson (1969)

À la suite du déluge du Saguenay de 1996, les propriétaires de barrages québécois ont dû se soumettre à la Loi sur la sécurité des barrages. Celle-ci régleme une série de mesures encadrant la construction, la modification et l'exploitation des barrages. Surtout, la Loi exige des propriétaires qu'ils assurent une surveillance et un entretien réguliers de leurs ouvrages. Hydro-Québec avait mis en place son programme de sécurité des barrages, dès 1988, notamment au niveau du diagnostic, mais aussi au niveau de l'exploitation, de la maintenance, des mesures d'urgences, de la gestion de l'information et de la gestion des enjeux de sécurité. Les activités liées au diagnostic incluent l'évaluation de l'état et du comportement des barrages, de même que l'état, la fiabilité et la fonctionnalité des ouvrages régulateurs, et l'évaluation de la sécurité des barrages.

Tel que signalé plus haut, les barrages d'Hydro-Québec ont été conçus et construits à différentes époques, avec des normes différentes, des matériaux de qualité initiale différents. De plus les charges s'appliquant sur ces ouvrages ont évolué par rapport à leur conception, par exemple au niveau du risque sismique. Finalement, concernant les ouvrages en béton, ceux-ci peuvent être affectés par une ou plusieurs pathologies, par exemple, la réaction alcali-granulat, le gel-dégel, la réaction sulfatique interne ou l'érosion des surfaces externes et des joints/fissures.

Afin de redonner une durée de vie à ces ouvrages dégradés et d'augmenter la capacité de production et/ou d'évacuation, plusieurs centaines de millions de dollars par année sont investis dans des projets de réfection. Des expertises sur le béton sont donc requises pour élaborer les stratégies de réalisation de ces projets.

Ainsi, les prochaines sections présenteront de manière globale les activités de diagnostic d'Hydro-Québec nécessaires pour assurer la sécurité des ouvrages, soit l'inspection, l'auscultation topographique et instrumentale, les expertises et la modélisation.

III. INSPECTION DES OUVRAGES EN BÉTON

Un des piliers de base de la sécurité des barrages est l'inspection visuelle des ouvrages. La méthode d'Hydro-Québec décrit les phénomènes à observer ayant un impact sur la sécurité à court, moyen et long terme, principalement les fissures, les venues d'eau, les éclatements, les délaminations et l'érosion. Elle peut se réaliser à pied, par appui sur corde (Figure 2), ou nacelle. L'inspection des passages hydrauliques est un peu plus complexe, aussi à pied ou par appui sur cordes, et le plus souvent dans un espace clos. Les relevés de dégradations sont consignés dans un système informatique interne assurant le suivi de l'évolution, généralement mis en plan et si disponible,

transcrits dans un modèle numérique 3D, afin de bien visualiser les zones dégradées et faciliter l'analyse.



Figure 2 - Inspection par appui sur cordes extérieures et dans un passage hydraulique

Afin d'améliorer la rapidité des inspections, plusieurs projets pilotes ont eu lieu pour valider la possibilité de réaliser ces inspections de béton par lasergrammétrie ou photogrammétrie par drones. La lasergrammétrie est réalisée à l'aide d'un appareil Leica ScanStation P40 et permet de réaliser un scan 3D complet des surfaces autour de l'équipement. L'un des avantages est d'améliorer la précision des relevés et des comparaisons ultérieures (Figure 3). Cependant, un logiciel adapté est requis et pour l'instant, l'identification des fissures se fait toujours manuellement à la craie par appui sur corde. La photogrammétrie par drones permet de coupler l'avantage d'un drone (accès plus facile aux endroits compliqués d'accès) et l'avantage de la photogrammétrie (autocorrélation d'images haute résolution et géoréférencées). Cela a été utilisé avec succès sur un évacuateur de crue (Figure 3) mais la quantité de données et le traitement requis sont importants.



Figure 3 – Lasergrammétrie dans un passage hydraulique et photogrammétrie par drone sur un évacuateur

Au niveau des nouvelles technologies d'inspection, le centre de recherche d'Hydro-Québec (CRHQ) a développé et continue de développer de nombreux équipements. Par exemple, le

Wirescan permet de réaliser des mesures à sec ou sous l'eau de la géométrie des surfaces verticales des évacuateurs, principalement les rainures de vannes.

Les inspections sous-marines sont réalisées à l'aide d'un robot sous-marin téléopéré. Les mesures de bathymétrie permettent de scanner par nuages de points les faces horizontales et verticales. Cette technique, couplée à une analyse numérique 3D de l'écoulement, a été utilisée avec succès à l'évacuateur LG-2 en 2018, afin de mesurer entre autres l'érosion de la dalle de dissipation et de confirmer les causes de cette érosion observée depuis la mise en fonction de l'évacuateur dans les années 1980 [Patarroyo et al., 2022] (Figure 4).

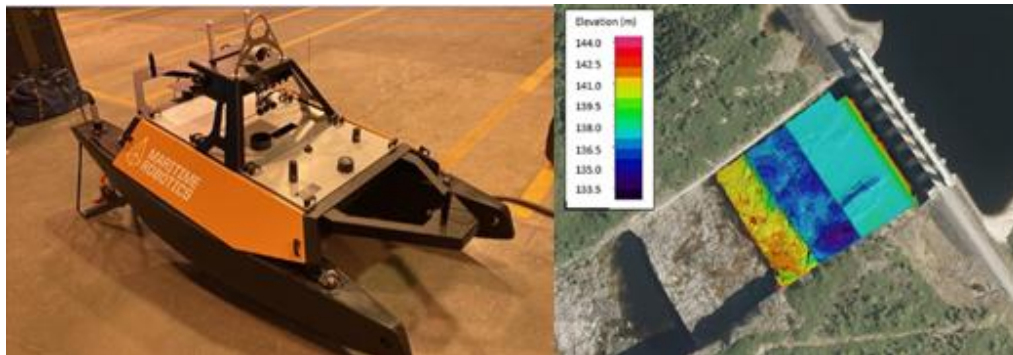


Figure 4 - Appareil de Bathymétrie et relevés de 2018 à l'évacuateur de LG-2

IV. AUSCULTATION DES OUVRAGES EN BÉTON

L'auscultation des ouvrages permet de suivre leur comportement dans le temps et de détecter d'éventuelles anomalies. Elle comprend les activités de relevés topographique et instrumental, ainsi que l'interprétation de ces données. Les mesures de prédilection pour les barrages en béton sont pour le suivi des déformations globales et des infiltrations, donc l'auscultation topographique, les pendules et les déversoirs.

Les repères d'auscultation topographique permettent de mesurer le déplacement d'un ouvrage dans les trois axes, en fonction d'un point de repère fixe, grâce à une station totale en X et Y ou par nivellement de précision en Z (microgéodésie). Les pendules directs et les pendules inversés sont parmi les principaux instruments de mesure de déplacement, avec les repères d'auscultation. Le pendule inversé est utilisé depuis 1968 chez Hydro-Québec [Moreau et al., 1972]. Elle consiste en l'installation d'un fil en acier inoxydable ancré à environ 15 à 30 m dans la fondation rocheuse. L'extrémité supérieure est quant à elle fixée à un flotteur dans un bassin d'antigel. Il est donc possible de mesurer des déplacements en X et Y à partir d'une table de mesure fixée au béton. La composante en Z est mesurée à partir d'un second fil, à base d'un acier à très faible dilatation thermique, fixé lui aussi à la fondation rocheuse. À partir du pendule inversé, il est possible de réaliser une mesure dite de guide fil auto-centreur. Il s'agit de mesurer le profil en X et Y du trou de forage du pendule en y forçant à chaque mètre le centrage du fil et ce sur toute sa hauteur. Par comparaison avec la mesure initiale du profil, on estime ainsi la déformation planimétrique du forage contenant le pendule. Cette méthode permet par exemple de détecter la présence de plan de fissuration avec un changement d'orientation des déplacements (mouvements relatifs). Le déversoir permet quant à lui de mesurer les débits d'infiltrations.

Les autres mesures réalisées sur nos ouvrages en béton sont les mesures de déformation locales (TVJ, extensomètre, fissuromètre) et de pressions (piézomètre), ainsi que de contraintes (généralement cellules de contrainte dans les câbles servant à la stabilité, la très grande majorité de nos barrages étant gravité). L'extensomètre, le fissuromètre et le TVJ (témoin de variation de joint) sont utilisés en galerie ou sur des faces accessibles alors que seul l'extensomètre permet de mesurer l'ouverture des fissures et des joints dans un forage. Le piézomètre, quant à lui, est généralement installé dans un forage et permet de mesurer la pression ou le niveau d'eau.

Toutes ces mesures sont regroupées dans un système informatique interne. Par la suite, les ingénieurs responsables du suivi de comportement sont capables d'interpréter les résultats en fonction de différentes conditions, dont le niveau du réservoir amont ou la température extérieure. Au niveau des analyses complexes, le modèle d'analyse de régression linéaire HST (hydrostatique, saisonnier, temporel) permet entre autres de séparer les effets réversibles et irréversibles dans les mesures de déplacements [Chouinard et al., 2009]. Par exemple, ce modèle a été utilisé pour déterminer les déplacements irréversibles du barrage Daniel-Johnson [Chouinard et al., 2009].

En 2020, Hydro-Québec a mis en place le Centre d'Analyse et de Maintenance Prévisionnelle (CAMP). Ce centre vise à exploiter le plein potentiel des données du parc de production, notamment les barrages et ouvrages régulateurs, en développant des outils prédictifs pour bonifier la surveillance, le diagnostic et la gestion des actifs. La première phase consiste en l'opérationnalisation de la surveillance, avec l'exploitation de l'actuel système d'acquisition automatique de données. Par la suite, l'utilisation de modèles de prédiction existant, tel que HST (voir plus haut), ou OpenBDLM [Gaudot et al., 2019] ou le développement de modèles d'IA à base de réseau de neurones profonds, sont prévus. Quelques études de cas pertinentes sur des barrages, au niveau d'un pendule, d'un fissuromètre et d'un déversoir et une comparaison entre les méthodes HST et OpenBDLM ont été réalisées [Côté et al., 2022].

V. EXPERTISE DES OUVRAGES EN BÉTON

L'expertise sur les ouvrages en béton regroupe tous les essais, non-destructifs et destructifs, réalisés sur un ouvrage affecté par une pathologie, afin de bien comprendre la problématique et ainsi recommander la solution de réparation adéquate. La réalisation d'essais destructifs passe par des forages de profondeurs variables, pouvant aller jusqu'à 30 m, et de diamètre variant généralement de 50 à 300 mm, grâce à des foreuses électriques ou hydrauliques. Une importance particulière est apportée au diamètre des granulats du béton et à l'obtention de carottes représentatives de l'ouvrage expertisé.

Tout d'abord, deux types d'essais sont réalisés directement dans les forages de structures en béton, ainsi que dans la fondation rocheuse. L'utilisation de la géocaméra, avec ses sondes optiques et acoustiques, permet d'obtenir une image digitale éclatée du forage et des informations sur la détection d'anomalies en paroi du forage, sur les vides ou reliefs et sur l'orientation des discontinuités. Une fois la géocaméra effectuée, des essais d'eau sous pression, de type Lugeon, sont réalisés pour évaluer la conductivité hydraulique du béton de masse, de la fondation rocheuse, mais surtout des contacts béton-roc et des fissures et joints béton-béton et roc-roc.

Les essais non-destructifs permettent d'obtenir rapidement et à moindre coût une cartographie des défauts, notamment la fissuration interne. Parmi les techniques utilisées récemment, il y a les méthodes acoustiques, en particulier la tomographie, acoustique et ultrasonique (UPV). Le principe de base de l'UPV, et la méthode employée par Hydro-Québec, est détaillé dans [Saint-Pierre et al., 2016]. Un projet pilote est en cours pour évaluer l'efficacité des méthodes « impulse response » (selon ASTM C1740) et « Spectral Analysis of Surface Waves » (selon ACI 228.R-13) pour détecter des défauts sous la surface de la crête de plusieurs barrages et évacuateurs en béton.

Parmi les essais destructifs réalisés sur des carottes de béton, les essais de résistance à la compression, de résistance à la traction directe et indirecte, du module élastique, du coefficient de poisson sont jugés standards. Dans les essais plus récents, l'essai de DRI « Damage Rating Index », selon [Villeneuve et al., 2012], et l'essai de SDT « Stiffness Damage Test », selon [Sanchez et al., 2013], sont de plus en plus utilisés sur les expertises de barrages. Ils permettent de quantifier l'endommagement du béton causé par la RAG et de le relier à un niveau d'expansion théorique (sur des éprouvettes de laboratoire, en gonflement libre). Un autre essai, celui du « pression tension », selon [Komar et al., 2017] a été utilisé pour un barrage affecté par le gel-dégel. Il s'agit d'un essai plus sensible à l'endommagement causé par le gel-dégel que les essais mécaniques standards. Finalement, afin de déterminer le potentiel de gonflement du béton, des essais d'expansion résiduelle et d'expansion ultime sont réalisés. Une synthèse récente de tous ces essais utilisés par Hydro-Québec, est présentée dans [Saouma, 2021], chapitres 2, 3, 4, 7 et 9.

Les essais en chantier permettent aussi de valider les résultats des modèles numériques (voir section suivante). Au barrage de Beauharnois, l'endommagement du béton global (prise d'eau, maximum 15 m d'épaisseur) et local (pilier central d'une prise d'eau, environ 2,5 m d'épaisseur) a été validé grâce à des essais de tomographie sismique. Malgré la détection de zones plus endommagées que d'autres, telles qu'identifiées par le modèle numérique, une corrélation avec des essais destructifs est toujours requise afin de bien corrélérer les résultats de l'essai non-destructif avec l'endommagement réel. Toujours à Beauharnois, la technique du slot-stress et des essais de validation de la réserve de plastification de l'acier d'armature ont été réalisés avec succès respectivement pour mesurer les contraintes de compression dans des zones identifiées et pour valider les résultats numériques. Les résultats finaux seront présentés en 2024 lors de la conférence ICAAR.

VI. MODÉLISATION ET JUMEAUX NUMÉRIQUES

La modélisation numérique des ouvrages hydrauliques a été utilisée à de nombreuses reprises depuis le milieu des années 1990, par les équipes d'Hydro-Québec sur Beauharnois [Gocevski et al., 2017], Daniel-Johnson et par des chercheurs universitaires [Léger et al., 1996]. La modélisation numérique permet de déterminer si ces structures sont sécuritaires malgré la présence de RAG ou d'autres pathologies, et de prédire le comportement à long terme ainsi que leurs performances face à différents cas de chargement, dont sismique.

Plus récemment, entre 2018 et 2020, la modélisation du barrage de Beauharnois a été réalisée par éléments finis par trois équipes distinctes, dont deux à l'interne, et validée par un comité d'experts internationaux. Les méthodologies utilisées par les équipes d'Hydro-Québec peuvent se retrouver dans [Saouma, 2021], chapitre 24 et dans [Nour et al., 2022]. Par ailleurs, [Roth et al., 2022] a présenté

ce modèle numérique en tant que référence étalon pour permettre à d'autres équipes de bien arrimer les activités de diagnostic et de modélisation et de valider leurs modèles.

Ce modèle comprend tout le barrage (barrages-poids, centrale, prise d'eau) et sa fondation rocheuse et possède plus de 19 millions de nœuds. Il a été calibré en fonction des données d'auscultation (voir plus haut), tel que les pendules et les repères d'auscultation, pouvant remonter jusqu'aux années 1970. Ce modèle inclut les armatures et les effets hydriques, thermiques, du fluage du béton et de la RAG. Une analyse de sensibilité a été réalisée sur les intrants initiaux majeurs du modèle et a démontré le peu d'influences de ces derniers. De plus, des recherches universitaires ont été menées pour développer une approche probabiliste sur l'incertitude des intrants de modèle de stabilité [Segura et al., 2021]. Le modèle de Beauharnois a permis de confirmer l'intégrité structurale de l'ouvrage, en date de 2020 (voir Figure 5), et de prédire le comportement de la structure jusqu'en 2070. Il s'agit aussi d'un outil très performant pour analyser les mécanismes de défaillances potentielles, notamment au niveau des jonctions et de l'évacuateur.

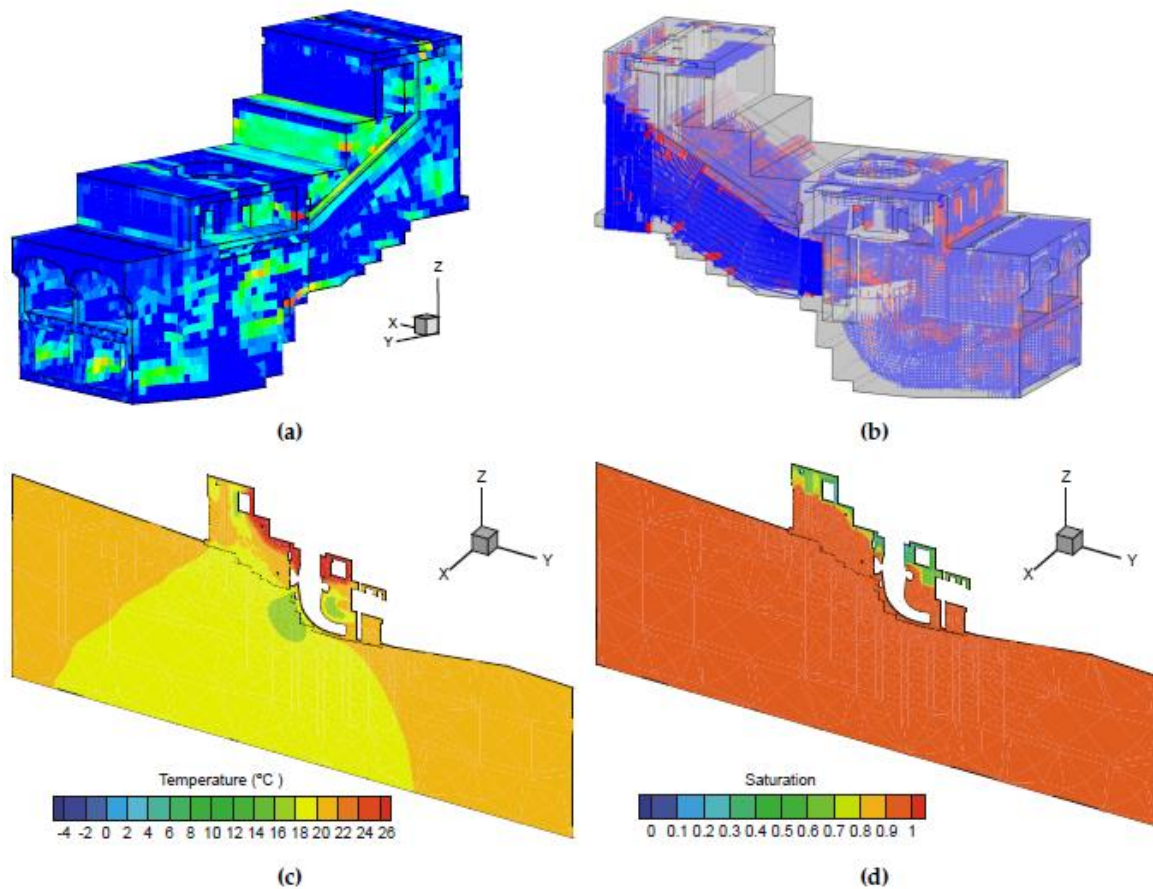


Figure 5 – Exemple de résultats du modèle numérique de Beauharnois : (a) ouverture de fissure (b) plastification des aciers (c) distribution thermique (d) distribution hydrique [Roth et al., 2022]

VII. CONCLUSION

Afin de protéger les personnes et les biens contre les risques associés à la présence de ses ouvrages, Hydro-Québec réalise de nombreuses activités de diagnostic sur ses ouvrages. À travers ses

différentes activités de diagnostic, Hydro-Québec continue d'innover, à l'interne et en collaboration avec le milieu universitaire et l'industrie, afin de demeurer à l'avant-garde et de viser l'amélioration de ces activités.

RÉFÉRENCES

- Chouinard, L., Côté, P., & Larivière, R. (2009). Analysis of Irreversible Displacements of Daniel-Johnson Dam. Graz, Autriche: Graz University of Technology, pp. 141-146.
- Chouinard, L., & Roy, V. (2009). Performance of Statistical Models for Analyzing the Long Term Behavior of Dams. Graz, Autriche: Graz University of Technology, pp. 147-152.
- Côté, P., Roy, V., Meynadier, A., & Miquel, B. (2022). Applicability of the Bayesian Dynamic Linear Model Method in Dam Behavior Analysis and Comparison with the HST Method. Baltimore: Dam Safety.
- Gaudot, I., Nguyen, L. S., K., & Goulet, J.-A. (2019). OpenBDLM, an Open-Source Software for Structural Health Monitoring Using Bayesian Dynamic Linear Models. Seoul: 13th International Conference on Applications of Statistics and Probability in Civil Engineering (ICASP13).
- Gocevski, V., & Yildiz, E. (2017). Numerical Analysis of AAR Affected Structures with Slot-Cuts. In Swelling Concrete in Dams and Hydraulic Structures: DSC 2017, pp. 263-276.
- Komar, A. J. K., & Boyd, A. J. (2017). Evaluating Freeze-Thaw Deterioration with Tensile Strength. Seoul: 2nd International Conference on Civil Engineering and Materials Science.
- Léger, P., Côté, P., & Tinawi, R. (1996). Finite Element Analysis of Concrete Swelling Due to Alkali-Aggregate Reactions in Dams. *Computers & Structures*, 60(4), 601-611.
- Moreau, R., & Benoît, B. (1972). Les Méthodes Topographiques Appliquées à L'Auscultation du Barrage Daniel Johnson (Manicouagan 5). *The Canadian Surveyor*, Volume Mars, pp. 19-37.
- Nour, A., & Cherfaoui, A. (2022). Finite-Element Modelling of Alkali-Aggregate Reaction in a Concrete Hydraulic Structure. *Construction Materials*, 175(3), 109-124.
- Patarroyo, J., & Mainville, É. (2022). Hydraulic Study of the Stilling Basin of the Robert-Bourassa Hydroelectric Facility. Granada, Spain: 39th IAHR World Congress.
- Roth, S.-N., & Miquel, B. (2022). Evaluation and Prediction of the Behaviour of the Beauharnois Dam. Ljubljana: 16th International Benchmark Workshop on Numerical Analysis of Dams - Theme B: AAR Affected Dam.
- Saint-Pierre, F., Philibert, A., Giroux, B., & Rivard, P. (2016). Concrete Quality Designation Based on Ultrasonic Pulse Velocity. *Construction and Building Materials*, Volume 125, 1022-1027.
- Sanchez, L., Fournier, B., Jolin, M., & Bastien, J. (2013). Evaluation of the Stiffness Damage Test (SDT) as a Tool for Assessing Damage in Concrete Due to ASR. *Cement and Concrete Research*, pp. 213-229.
- Saouma, V. E. (2021). *Diagnosis & Prognosis of AAR Affected Structures - State-of-the-Art Report of the RILEM Technical Committee 259-ISR*. 1st éd. Cham, Switzerland: Springer.
- Segura, R., Miquel, B., Paultre, P., & Padgett, K. (2021). Accounting for Uncertainties in the Safety Assessment of Concrete Gravity Dams: A Probabilistic Approach with Sample Optimization. *Water*, 13(855).
- Villeuneuve, V., Fournier, B., & Duchesne, J. (2012). Determination of the Damage in Concrete Affected by ASR - The Damage Rating Index (DRI). In 15th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction (ICAAR), Austin (Texas), Electronic.