

Lyon
5-6 juillet 2012

L'auscultation non destructrice des ouvrages en béton : Bilan de dix ans de recherche

Gérard Ballivy, ing., D.Sc.A.
Patrice Rivard, ing., Ph.D.
Jamal Rhazi, ing., D.Sc.A.
Département de génie-civil
Faculté de Génie
Université de Sherbrooke

1 Introduction

Il est présenté ici un aperçu des travaux de recherche qui ont été conduits à l'Université de Sherbrooke de 2001 à 2011 dans le cadre d'une chaire de recherche industrielle (titulaire G. Ballivy). Cette chaire était supportée financièrement par dix partenaires industriels et le Conseil de Recherche en Science Naturelles et Génie (CRSNG) du Canada. Cette chaire, d'un mandat initial de cinq ans (2001-2006) a été renouvelée par un second mandat (2006-2011). Les travaux de la chaire sont maintenant terminés, cependant, les recherches en auscultation se poursuivent dans le cadre du Groupe de Recherche en Auscultation et Instrumentation (GRAI) dont le responsable est Patrice Rivard (Professeur à l'Université de Sherbrooke).

2 Bilan des cinq premières années de la chaire (2001-2006)

Les activités menées par la Chaire au cours de ses cinq premières années d'existence ont traité des cinq thématiques suivantes :

- a) estimation des propriétés mécaniques du béton;
- b) détection des fissures dans le béton;
- c) évaluation de l'état de corrosion dans les dalles des tabliers de ponts;
- d) évaluation des dommages causés par la réaction alcali-granulat (RAG);
- e) évaluation de l'état des câbles de renforcement.

a) La thématique concernant l'estimation des propriétés mécaniques du béton par les techniques non destructives avait pour objectif de déterminer les liens entre les principales propriétés physiques du béton sur lesquelles se basent les techniques d'essai non destructives (résistivité électrique, permittivité diélectrique, vitesse et atténuation des ondes longitudinales et d'ondes de Rayleigh, conductivité et diffusivité thermiques), et ses propriétés mécaniques (résistance à la compression et module de Young). Cette thématique a notamment exigé le développement de nouveaux outils pour la mesure des propriétés thermiques et électro-magnétiques du béton (sonde coaxiale à terminaison ouverte), et elle a permis d'établir des corrélations, par des études de sensibilité, entre les variations des différentes propriétés physiques et celles des propriétés mécaniques du béton [1, 2, 3, 4, 5]

Les résultats de ces travaux ont notamment été exploités pour valider in-situ, le développement d'une technique acoustique basée sur les ondes de Rayleigh et permettant d'avoir le profil du module de Young en fonction de la profondeur sous la surface [6, 7]. D'autre part, nos travaux ont permis d'améliorer les performances de la technique de tomographie acoustique en considérant non seulement l'analyse des variations de la vitesse de propagation des ondes de compression [8] mais également leur atténuation [9, 10].

b) Détection des fissures dans le béton. Il a été démontré pour la première fois par l'expérimentation, que les ondes électromagnétiques (radar) de moyennes fréquences (400 MHz) peuvent être utilisées pour sonder des épaisseurs de béton allant jusqu'à 3.5 m. D'autre part, l'interaction de ces ondes avec les fissures dont l'ouverture est de 0,5 mm et plus, donne lieu à des réflexions détectables lorsque les fissures sont saturées d'eau et à des réflexions de plus en plus intenses lorsque l'ouverture des fissures augmente [11, 12]. Cette thématique a aussi exploré les possibilités et révélé la pertinence des ondes acoustiques de surface pour détecter l'écaillage dans le béton [6, 13].

c) Évaluation de l'état de la corrosion dans les dalles des tabliers de ponts en béton armé. Nous nous sommes penchés sur les possibilités du radar à caractériser la probabilité de la corrosion des armatures d'acier dans le béton. Notre objectif était d'offrir aux gestionnaires des infrastructures de transport un outil alternatif à l'essai du potentiel de corrosion qui soit assez fiable et qui ne présente pas les inconvénients de l'essai de potentiel (coûts de plus en plus élevés, interruption du trafic routier pendant les essais, etc.). Les travaux ont donc porté sur des mesures radar et des mesures de potentiel de corrosion pour établir une correspondance entre les échelles de ces deux types de mesure. Les expérimentations ont été conduites en laboratoire et in-situ. Deux approches de traitement des données radar ont été explorées : la première approche [14, 15] n'est applicable que lorsque l'épaisseur du revêtement bitumineux est supérieure à 70 cm car elle considère l'amplitude de réflexion des ondes radar sur la surface du béton (l'amplitude augmente avec la probabilité de corrosion). La deuxième approche développée [16, 17, 18] considère plutôt l'atténuation des ondes radar dans le béton (l'atténuation augmente avec la probabilité de corrosion). Les deux approches sont complémentaires et doivent être jumelées pour accroître la fiabilité des prédictions.

d) La caractérisation de la réaction alcalis-granulat (RAG) dans le béton s'est effectuée à l'aide de plusieurs techniques pour cerner leur degré de sensibilité à l'apparition et à la progression de l'expansion et de la fissuration du béton induites par cette réaction. Parmi l'ensemble des procédés expérimentés (radar, résistivité électrique, ondes acoustiques), les techniques basées sur la propagation des ondes acoustiques (ondes longitudinales et ondes de Rayleigh) sont apparues les plus appropriées à cette problématique. Ceci s'est dégagé des nombreuses expérimentations effectuées in-situ sur des écluses de la Voie maritime du Saint-Laurent à Montréal et validées par des essais de caractérisation mécaniques sur des échantillons prélevés des écluses par carottage [19]. Les essais en laboratoire ont aussi indiqué la pertinence de la mesure des fréquences de vibration des échantillons [10] ainsi que l'étude du comportement acoustique non linéaire du béton [20].

e) Évaluation de l'état des câbles de renforcement [21, 22, 23]. Cette thématique concernait le développement d'une nouvelle méthode permettant la détection des vides d'injection dans les câbles de précontrainte noyés dans le béton. Cette méthode a consisté à chauffer le câble en y faisant circuler un courant électrique alternatif, et à observer la variation de la température en surface de l'élément au moyen d'une caméra thermique. À partir de modèles réduits de poutres post-contraintes, l'étude a permis d'éliminer l'influence du bruit de mesure sur les thermogrammes, de détecter les vides d'injection et de s'affranchir de l'influence des vides d'injection dans le positionnement du tracé des câbles. Le procédé de chauffage par effet Joule a également permis de caractériser les propriétés thermophysiques du béton de recouvrement par l'utilisation d'un modèle en différence finie des poutres et d'une méthode inverse.

3 Deuxième mandat de la chaire

Les travaux du deuxième mandat de la Chaire (2006-2011) concernent les trois thèmes suivants :

Thème 1 : Évaluation de l'état des dalles des tabliers de ponts en béton armé

L'objectif du thème 1 était de développer et valider des technologies permettant notamment de détecter et caractériser la corrosion des armatures et de la délamination dans le béton. Ces outils pourront être utilisés en ingénierie pour optimiser les travaux d'entretien et pour élaborer des modèles plus réalistes de prédiction de la durée de vie des infrastructures qui prendront en considération les mécanismes et l'évolution dans le temps de la dégradation des matériaux.

Thème 2 : Évaluation de l'état des ouvrages de retenue hydraulique

Les travaux menés par la Chaire au cours du deuxième mandat ont permis de développer des outils permettant d'évaluer l'état du béton des ouvrages de retenue hydraulique (ex. technique d'analyse spectrale des ondes de surface, technique de tomographie acoustique). Les travaux du deuxième mandat portent sur le développement de techniques de mesure pour aider les gestionnaires à évaluer correctement la stabilité des barrages en béton. Plus précisément, ces travaux seront consacrés à l'évaluation de la qualité d'adhérence de joints de coulée et à l'évaluation de la qualité d'adhérence au contact béton-roc.

Thème 3 : Évaluation de l'intégrité des câbles de renforcement

Les travaux sont consacrés à la détection et la localisation des désordres (ruptures) dans les câbles de tension et à l'évaluation de la tension dans les câbles. 5

3.1 Évaluation de l'état des dalles des tabliers de ponts en béton armé

Les activités concernant la **caractérisation par radar de la corrosivité** du béton armé des dalles sont une continuité des activités menées au cours du premier mandat de la Chaire. Elles s'attachent à approfondir les résultats concluants déjà obtenus sur les corrélations entre les mesures radar et les mesures de potentiel de corrosion. Ainsi, les essais in situ se sont poursuivis afin de constituer une banque de données suffisamment importante sur les mesures radar versus l'état de corrosion des armatures pour élaborer des devis techniques applicables au plus grand nombre de structures en service. Les essais ont notamment concerné le pont de l'île Bizard (Montréal), un viaduc sur l'autoroute Laurentienne (Québec), et quatre autres structures en Estrie dans les municipalités de Johnville, Waterville, Danville et Magog.

Au cours de ses deux mandats, la Chaire a mené d'importants travaux expérimentaux sur site pour étudier l'aptitude de la technique du radar à détecter la délamination dans les dalles de béton armé. Les essais ont concerné le viaduc Berri, le pont J. Bizard et le viaduc H. Bourrassa à Montréal. Des relevés radar avaient été effectués sur les dalles de ces structures. Pour chaque structure, des endroits où le béton était sain et des endroits où le béton avait été jugé délaminé avaient été identifiés à partir de l'analyse in situ des relevés. La validation des analyses a été effectuée avec succès par prélèvement d'échantillons de béton des dalles [21, 23].

Durant l'été 2008, des essais de potentiel de corrosion sur deux dalles d'un tablier de pont ont été effectués par l'extrados et par l'intrados. L'une des dalles était mince (17 cm d'épaisseur) et l'autre dalle était épaisse (50 cm d'épaisseur). Dans les deux cas, les cartographies de potentiel par l'extrados et par l'intrados étaient similaires mais non identiques. Ce résultat s'explique par le fait que l'infiltration des éléments corrosifs (eau et ions chlorure) s'est effectuée à travers toute l'épaisseur. Ceci ne peut pas toujours être le cas. Ces travaux montrent que la prédiction de l'état de corrosion des armatures supérieures à partir des mesures par l'intrados ne peut pas toujours être fiable [9].

Enfin, le quatrième axe de recherche du thème 1 concerne le suivi en temps réel du comportement des dalles de béton armé par « Micro-Electro-Mechanical Systems (MEMS) ». Les travaux de la Chaire relatifs à cet axe constituent une étape vers la réalisation d'ouvrages "intelligents", c'est-à-dire « aptes à communiquer » aux gestionnaires des informations sur leur état.

3.2 Évaluation de l'état des ouvrages de retenue hydraulique

Cette thématique comporte notamment des activités visant à déterminer les aptitudes des techniques de radar et d'impact-echo à évaluer l'état des joints de coulée. De mars 2008 à août 2009, des investigations expérimentales ont été effectuées à deux reprises sur le barrage Rapides-des-Iles dans la région de Rouyn-Noranda (nord-est du Québec). Les essais d'impact-echo n'ont pas été concluants compte tenu vraisemblablement de la profondeur des joints (plus de 2 m). Par contre, les relevés radar ont mis en évidence un certain nombre de réflecteurs dont les positions ont été localisées au niveau des joints de coulée [18]. Un carottage de validation sera effectué durant l'automne 2009 ainsi que d'autres essais radar à d'autres endroits du barrage. 6

Ce thème de recherche concerne l'évaluation de la qualité d'adhérence de joints de coulée et du contact béton-roc. La Chaire s'est penchée sur la caractérisation de l'adhérence par des outils de diagraphie, et en particulier par la technique du Televiewer (technique qui permet d'avoir une image des parois d'un forage à partir de l'intensité de réflexion des ondes acoustiques sur les parois). Le but de cette recherche est de déterminer la capacité de cet outil à déceler les problèmes au niveau des interfaces et à mesurer l'ouverture des joints. La mesure de cette ouverture est principalement une question de résolution de la sonde de mesure et de l'interprétation de la réponse des épontes. Des essais ont été réalisés pour connaître la résolution maximale de la sonde de mesure en fonction du diamètre du trou et de l'angle d'incidence au niveau des fissures. Les contacts non cohésifs ouverts sont faciles à reconnaître grâce aux techniques d'imagerie. Cependant, il devient plus ambigu de différencier un contact cohésif d'un contact parfaitement emboîté [15]. Un programme d'essais sur des « pastilles » de mortier et de roc a été réalisé afin de vérifier l'effet du forage sur la qualité des épontes après forage pour des contacts cohésifs et non cohésifs, mais parfaitement emboîtés.

La deuxième partie de ce projet tente d'effectuer une corrélation entre les propriétés mécaniques des matériaux et les informations que l'on peut extraire des relevés d'imagerie. Le béton est un matériau hétérogène composé de plusieurs éléments. Certaines de ces composantes macroscopiques peuvent être détectées par l'imagerie en trou de forage. Les plus importantes sont les granulats, la pâte de ciment et les vides importants (pore « vuggy »). Chacun de ces éléments peut être quantifié par un traitement de l'image acoustique. Cependant, il faut tenir compte du fait que la sonde de mesure n'est pas toujours parfaitement centrée dans le trou de forage. Une procédure visant la correction des résultats a été développée. Ceci permet de déterminer l'emplacement des joints de coulée cohésifs qui ne sont pas visuellement détectables. En effet, dans les barrages anciens, on remarque souvent une augmentation du pourcentage de granulats à l'approche d'un joint. Ceci est principalement attribuable à la présence de très gros granulats et à la ségrégation.

3.3 Évaluation de l'état des câbles et des ancrages

Les recherches concernant l'évaluation de l'état des ancrages sont en cours depuis juin 2009. Des blocs de béton avec des ancrages ont été testés par différentes techniques, notamment la technique de pulse-echo. L'état de ces ancrages a également été évalué par les techniques de l'acoustique non linéaire développées dans la première phase de la chaire. Parallèlement à ces activités, la Chaire travaille aussi sur la détection des vides d'injection dans les gaines des câbles de post-tension. Des essais ultrasonores ont été effectués sur des dalles de béton avec des gaines contenant des vides d'injection de différents volumes.

4 Mémoires et thèses

Année	Nom	Titre de la recherche	Directeur
2001	Clermont Gravel, Ph.D.	Contribution à l'étude des mécanismes des réactions alcalis-granulats	G. Ballivy
2002	Christian Leclerc, M.Sc.A	Validation des capteurs à fibre optique pour l'instrumentation des barrages en béton	G. Ballivy
2002	Stéphane Laurens, Ph.D.	Aptitude de la technique radar à la caractérisation du béton d'enrobage – Aide au diagnostic de la corrosion des armatures	G. Ballivy
2002	Danielle Palardy, Ph.D.	Contribution au développement d'un système à base de	G. Ballivy

2002	Patrice Rivard, Ph.D.		connaissances pour l'ingénierie des injections de coulis en milieux fissurés Contribution à l'étude de l'expansion résiduelle des bétons atteints de réactivité alcalis-silice	G. Ballivy
2002	Daniel Laganière, M.Sc.A.		Caractérisation, stabilisation et valorisation des phosphogypses marocains	G. Ballivy
2003	Stéphanie Perret, Ph.D.		Rôle du degré de saturation des sables fins à moyens sur leur injectabilité par des coulis de ciment microfin	G. Ballivy J. Rhazi
2004	Frédéric Besozzi, M.Sc.A.		Évaluation du potentiel de production d'acide des stériles et du roc de la mine Eustis	G. Ballivy
2004	Guillaume Claver Guissi, M.Sc.A.		Contribution à l'étude des corrélations entre les variations de résistivité électrique et les variations de la résistance à la compression	G. Ballivy
2004	Bilal Filali, M.Sc.A.		Étude des propriétés diélectriques du béton par sonde coaxiale et par antenne radar	J. Rhazi G. Ballivy
2005	Riad Al Wardany, Ph.D.		Caractérisation non destructive des structures en béton au moyen des ondes dispersives de Rayleigh et de Lamb	G. Ballivy J.-L. Gallias (France)
2005	Christopher Ostrowski, Ph.D.		Auscultation des ouvrages en béton par thermographie infrarouge active et passive	G. Ballivy
2005	Zoubir Mehdi Sbartai, Ph.D.		Caractérisation physique des bétons par radar – approche neuromimétique de	G. Ballivy G. Arliguie (France)

l'inversion

2005

Céline Perlot,
Ph.D.

Influence de la G. Ballivy
décalcification de M. Carcasses (France)
matériaux cimentaires
sur les propriétés de
transfert: application
au stockage
profond de déchets
radioactifs

5 Publications

5.1 Revues

- ROUSSEAU B., RIVARD P., MARACHE A., BALLIVY G., RISS J. (2012) - Limitations of laser profilometry in measuring surface topography of polycrystalline rocks, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, In proof.
- MORADIAN Z. A., BALLIVY G., RIVARD P. (2012) Correlation between acoustic emission source locations and damaged zones of rock joints under direct shear test, *Canadian Geotechnical Journal*, sous presse.
- MORADIAN Z. A., BALLIVY G., RIVARD P. (2011) Application of Acoustic Emission for Monitoring Shear Behavior of Bonded Concrete-Rock Joints under Direct Shear Test, accepté *Canadian Journal of Civil Engineering*,
- KODJO S.A., RIVARD, P. COHEN-TENOUI F., GALLIAS, J.L. (2011) Impact of the alkali-silica reaction products on slow dynamics behavior of concrete, *Cement & Concrete Research*, 41 (4):422-428.
- MORADIAN Z.A., BALLIVY, G., RIVARD, P., GRAVEL C., ROUSSEAU, B. (2010) Evaluating damage during shear tests of rock joints using acoustic emissions, *International Journal of Rock Mechanics*, 47.(4), June 2010, 590-598.
- RIVARD P., BALLIVY G., GRAVEL C., SAINT-PIERRE F. (2010) Monitoring of an hydraulic structure affected by ASR: A case study, *Special issue Cement & Concrete Research*, 40 : 676-680.
- RHAZI, J., KODJO, S. (2010) Non-destructive evaluation of concrete by the quality factor. *International Journal of Physical Sciences*, 15 p.
- SARGOLZABI, M., KODJO, S.A., RIVARD P., RHAZI J. (2010) Effectiveness of nondestructive testing for the evaluation of alkali-silica Reaction in concrete, *Construction & Building Materials*, 24(8): 1398-1403.
- ELBALLOUTI, A., RHAZI, J., BELATTAR, S. (2010) Comparative study of the numerical and experimental methods in the field of non destructive testing by infrared thermography, *The European Physical Journal - Applied Physics*, 50 (2), 12 p.
- RHAZI, J. (2010), Geophysical investigation of Civil Engineering Structures. *FastTimes- Journal of the Environmental and Geophysical Society*, 15 (2), 17-25.
- KABIR S., RIVARD P., HE, D.C., THIVIERGE, P. (2009) Damage assessment for a concrete dam using image processing techniques on acoustic borehole imagery, *Construction & Building Materials*, 23: 3166–3174
- AL WARDANY, R., BALLIVY, G, RIVARD P. (2009) Condition assessment of concrete in hydraulic structures by surface wave non-destructive testing, *Materials & Structures*, (42), 251-261.
- ASSOULI, B., BALLIVY, G., RIVARD, P. (2008) Influence of environmental parameters on the application of standard ASTM C876-91: half-cell potential measurements, *Corrosion Engineering, Science and Technology*, 43 (1), 93-96.
- BOURDI, T., RHAZI, J.E., BOONE, F., BALLIVY, G., (Oct. 2008) Application of Jonscher model for the characterization of the dielectric permittivity of concrete, *Journal of Physics D: Applied Physics*, 41 (20), 205-213.
- FILALI, B., RHAZI, J., BOONE, F., BALLIVY, G. (2008) Design and calibration of a large open-ended coaxial probe for the measurement of the dielectric properties of concrete. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 56 (10), 2322-2328.
- AL WARDANY, R., BALLIVY, G., GALLIAS, J.-L., SALEH, K., RHAZI, J. (2007) Assessment of concrete slab quality and layering by guided and surface wave testing, *American Concrete Institute – Materials*, 104 : 268-275. 10

SAINT-PIERRE, F., RIVARD, P., BALLIVY, G. (2007) Measurement of the alkali-silice reaction progressing by ultrasonic waves attenuation, *Cement and Concrete Research*, 37 (6), 948-956.

PERLOT, C., BOURBON, X., CARCASSES, M., BALLIVY, G. (2007) The adaptation of an experimental protocol to the durability of cement engineered barriers for nuclear waste storage, *Magazine of Concrete Research*, 59 (5), 311-322.

KABIR, S., RIVARD, P., BALLIVY, G. (2008) Neural network-based damage classification of bridge infrastructure using texture analysis, *Revue canadienne de génie civil*, 35 (3): 258-267.

SBARTAI, Z. M., LAURENS, S., RHAZI, J., BALAYSSAC, J. P., ARLIGUIE, G. (2007), Using radar direct wave for concrete condition assessment: Correlation with electrical resistivity, *Journal of Applied Geophysics*, 62 (4), 361-374.

LAURENS, S., EL BARRAK, M., BALAYSSAC, J.P., RHAZI, J. (2007) Aptitude of the near-field direct wave of ground-coupled radar antennas for the characterization of the concrete. *Construction and Building Materials*, 21, 2072-2077.

RIVARD, P., BÉRUBÉ, M.A., OLLIVIER, J.P., BALLIVY, G. (2007) Alkalinity decrease of pore solution expressed from concrete tested for alkali-silica reaction, *Materials and Structures*, 40 (9), 909-941.

KABIR S., RIVARD P. (2007) Damage Classification of concrete structures based on Grey Level Co-occurrence Matrix using Haar's Discrete Wavelet Transforms, *Computers & Concrete*, 4(3):243-257.

PERLOT, C., BALLIVY, G., CARCASSES, M., BOURBON, X. (2006) The environmental permeameter - An original water permeability measurement replicating dynamical degradation, *Revue Européenne de Génie Civil*, 10,(9), 1177-1186.

SBARTAÍ, Z.M., LAURENS, S., BALAYSSAC, J.-P., ARLIGUIE, G., BALLIVY, G. (2006) Ability of radar ground- coupled antenna for NDT of concrete structures, *NDT&E International*, 39 (5), 400-407.

SBARTAÍ, Z.M., LAURENS, S., BALAYSSAC, J.-P., BALLIVY, G., ARLIGUIE, G. (2006) Effect of concrete moisture on radar signal amplitude, *American Concrete Institute –Materials*, 103 (6), 419-426.

RHAZI, J. (2006) Evaluation of concrete structures by the acoustic tomography technique. *Structural Health monitoring Journal International*, 5 (4), 333-342.

FILALI, B., RHAZI, J., BALLIVY, G. (2006) Mesure des propriétés diélectriques du béton par une large sonde coaxiale à terminaison ouverte. *Canadian Journal of Physics*, 84 (5), 365-379.

GHEORGHIU, C., RHAZI, J., LABOSSIÈRE, P. (2005) Impact Resonance Method for Fatigue Damage Detection in RC Beams with CFRP. *Revue Canadienne de génie civil*, 32 (6), 1103-1113.

LAURENS, S., BALAYSSAC, J.-P., RHAZI, J., KLYSZ, G., ARLIGUIE, G. (2005) Non destructive evaluation of concrete moisture by GPR: experimental study and direct modeling, *Journal of Materials and Structures (RILEM)*, 30 (283), 827-832.

RHAZI, J. (2005) Nondestructive testing in civil engineering: from research to education, *Materials Evaluation*, August, 808–811.

RIVARD, P., BALLIVY, G. (2005) Assessment of the expansion related to alkali-silica reaction by the Damage Rating Index method, *Construction and Building Materials*, 19 (2), 83-90.

RIVARD, P., BALLIVY, G. (2003) Application de méthodes pétrographiques pour l'évaluation de l'état de dégradation du béton affecté par la l'alkali-réaction, *Bulletin des laboratoires des Ponts et Chaussées*, (244-245), 73-90.

LAURENS, S., BALAYSSAC, J.P., RHAZI, J., BISARO, J.P. (2003) Influence de l'humidité de surface du béton sur l'onde directe du radar, *Bulletin des laboratoires des Ponts et Chaussées*, 239, 71-78. 11

- RHAZI, J., BALLIVY, G. (2003) Le contrôle non destructif des ouvrages de génie civil, *Bulletin des laboratoires des Ponts et Chaussées*, 239, 121-135.
- RIVARD, P., FOURNIER, B., BALLIVY, G. (2002) 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 (2), 80-90.
- BALAYSSAC, J.-P., LAURENS, S., RHAZI, J. (2002) Utilisation du Radar pour la détection de zones à risque de corrosion dans le béton armé, *Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées*, 273, 99-102.
- RHAZI, J., HASSAIM, M., BALLIVY, G., HUNAIDI, O. (2002) Effects of concrete non homogeneity on Rayleigh wave dispersion, *Magazine of Concrete Research*, 54 (3), 193-201.
- LAURENS, S., BALAYSSAC, J.P. , RHAZI, J., ARLIGUIE, G. (2002) Influence of concrete relative humidity on the amplitude of Ground-Penetrating Radar (GPR) signal, *Journal of Materials and Structures (RILEM)*, 35 (248), 198 – 203.
- QUIRION, M., BALLIVY, G. (2001) Laboratory investigation on Fabry-Perot sensor and conventional extensometers for strain measurement in high performance concrete, *Canadian Journal of Civil Engineering*, 27 (5), 1088-1093.
- HASSAIM, M., RHAZI, J., BALLIVY, G., KHAYAT, K. (2001) Évaluation de l'état du béton par la technique d'analyse spectrale des ondes de Rayleigh, *Revue canadienne de génie civil*, 28 (6), 1018-1028.
- PERRET, S., KHAYAT, K.H., GAGNON, E., RHAZI, J. (2001) Repair of 130-year old masonry bridge using high-performance cement grout, *ASCE Bridge Engineering Journal*, Jan.-Feb., 17 (1), 31-37.
- RHAZI, J., BALLIVY, G., NORMANDEAU, J. (2001) Auscultation des dalles de structures par radar, *Innovation Transport*, 10, 3-5.

5.2 Publications dans des comptes rendus de conférences

- ROUSSEAU B., RIVARD P., BALLIVY B., RISS J., MARACHE A. (2011) - Characterization of the roughness: statistic study of the interfaces of dams, Association Canadienne des Barrages, Conférence annuelle, Fredericton, 15-20 octobre 2011, 15p.
- ROUSSEAU B., RIVARD P., BALLIVY B., RISS J., MARACHE A.. (2011) - Study and characterization of the roughness: the interfaces of gravity dams, 2011 Pan-Am CGS conference, Toronto, 2-6 octobre 2011, Toronto, 6p.
- FILALI, B., BOONE, F., RHAZI, J., BALLIVY, G., (2011) Design and calibration of a large open-ended coaxial probe for the measurement of the dielectric properties of concrete, *PIERS 2011*, Marrakesh, Maroc, 20-23 mars, 7 p.
- FILALI, B., RHAZI, J., BOONE, F., BALLIVY, G., (2011) Characterization of the GPR Surface Waves for Civil Engineering Applications, *PIERS 2011*, Marrakesh, Maroc, 20-23 mars, 5 p.
- BOUKARI, Y., RIVARD P., BULTEEL D., BALLIVY G., ABRIAK, N.E. (2011) Comparative study of nonlinear resonance and wave interaction techniques for concrete damage assessment, *International Symposium on Nondestructive Testing of Materials and Structures*, Istanbul (Turquie), 15-18 mai.
- MORADIAN, Z.A., BALLIVY, G. , RIVARD, P. ANDRÉ, C. (2010) Effect of normal load on shear behavior and acoustic emissions of rock joints under direct shear loading, *European Rock Mechanics Symposium, EUROCK 2010*, Lausanne, Suisse (June 15-18, 2010), 219-222.
- LATASTE J.F., RIVARD P. BREYSSE, D. (2010) Assessment of debonding and delamination in reinforced concrete structure by means of NDT, *soumis à MEDACHS10 International Congress, La Rochelle (France), 28-30, April 2010* 12

ROUSSEAU B., BALLIVY G., RIVARD P., GRAVEL C., MARACHE A., RISS J. (2010) Study and characterization of the roughness of the interfaces of a gravity dams, *63rd Canadian Geotechnical Conference & 6th Canadian Permafrost Conference*, September 12-16, 2010, Calgary, 6 p.

BOUKARI Y., RIVARD P. BULTEEL, D. ABRIAK N. (2010) Mutli-scale diagnosis of concrete damage caused by alkali-silica reaction, *2nd Int Symp. on Service Life Design for Infrastructure*, Delft (Netherlands), 4-6 oct. 2010.

NZUMOTCHA TCHOUMKAM L.A., CHOUTEAU M., GIROUX B., RIVARD P., SALEH K., CÔTÉ A. (2010) A case study of self-potential detection of seepage at the junction of two embankment dams, *SAGEEP annual meeting, Keystone (USA)*, April 11-15 2010.

HAMROUCHE, R., KLYSZ, G., BALAYSSAC, J.P., LAURENS, S., RHAZI, J., BALLIVY, G., ARLIGUIE, G. (2009) Numerical modeling of ground-penetrating radar (GPR) for the investigation of jointing defects in brick masonry structures, *7th Int. Conf. on Non-Destructive Testing in Civil Engineering (NDTCE'09)*, Nantes, France, June 30th – July 3rd, 2009, 6 p.

KODJO, S.A., RIVARD, P. COHEN-TENOUDJI, F. GALLIAS, J.-L. (2009) Evaluation of damages due to alkali-silica reaction with nonlinear acoustics techniques, *Proceedings on Acoustics*, Lisbon, Portugal (June 1st -5th) , 7, 10 p.

RHAZI, J. (2009) Half-cell potential test from the upper-side and the lower-side of reinforced concrete slabs: a comparative study, *7th Int. Conf. on Non-Destructive Testing in Civil Engineering (NDTCE'09)*, Nantes, France, June 30th – July 3rd, 2009, 6 p.

SARGOLZAH, M., RIVARD, P., RHAZI, J., (2009) Evaluation of residual reactivity of concrete cores from ASR-affected structures by non-destructive tests. *The 7th Int. Conf. on Non-Destructive Testing in Civil Engineering (NDTCE'09)*, Nantes, France, June 30th – July 3rd, 2009, 6 p.

MORADIAN, Z.A., BALLIVY, G., GRAVEL, C., SALEH K. (2008) Analysis of the shear strength of rock and concrete joints using results of the constant normal load shear test, *5th Asian Rock mechanics Symposium (ARMS5)*, ISRM , 415-422.

THIVIERGE P., RIVARD P., BALLIVY G. (2008) Borehole logging for assessing concrete dam discontinuities, *Congrès annuel de l'Association canadienne des barrages*, Winnipeg (Canada), octobre 2008.

BALLIVY, G., GRAVEL, C., EL MALKI, T., RIVARD P., ROUSSEAU, B., GAGNON, J. (2007) The shear strength of joints in existing dam foundations, *11th Congress of International Society for Rock Mechanics*, Lisbon, Portugal, Juillet 2007, 711-714.

RHAZI, J., DOUS, O., LAURENS, S. (2007) A new application of the GPR technique to reinforced concrete bridge decks, *4th Middle East Nondestructive Testing Conference*, Kingdom of Bahrain, Déc. 2007.

RHAZI, J., NAAR, S., SIRIEIX, C. (2007) Aptitude de la thermographie infrarouge à détecter les vides et nids d'abeille dans le béton, *Diagnobéton*, Aix en Provence (France).

SAINT-PIERRE, F., SBARTAI, Z. M., RIVARD, P., BALLIVY, G. (2006) Characterization of the alkali-silica reaction by ultrasonic waves attenuation and resonant frequency, *7th CANMET/ACI Int. Conf. on durability of concrete*, Montréal, mai 2006, supplementary papers, 391-408.

KABIR, S., RIVARD, P., BALLIVY, G. (2006) Detection of AAR deterioration patterns in concrete using wavelets for multiscale texture analysis, *7th CANMET/ACI Int. Conf. on durability of concrete*, Montréal, mai 2006.

RIVARD, P., BALLIVY, G., ROUSSEAU, S. (2006) Relationship between physical and mechanical properties of concrete affected by AAR : application in field, *Marc-André Bérubé Symposium on AAR in concrete*, *8th CANMET/ACI Int. Conf. on recent advances in concrete technology*, Montréal, mai 2006, 357-367. 13

KABIR, S., RIVARD, P., BALLIVY, G. (2006) Detection of AAR deterioration patterns in concrete using wavelets for multiscale texture analysis, *Proceedings of 7th CANMET/ACI Int. Conf. on durability of concrete*, Montréal, mai 2006, p.127-145.

AL WARDANY, R., BALLIVY, G. RIVARD, P. (2006) Investigation of concrete quality in hydraulic locks by surface wave nondestructive testing, *NDE Conf. on Civil Engineering*, St. Louis (USA), August 2006.

RHAZI, J., LAURENS, S., DOUS, O. (2006) Non-destructive testing of reinforced concrete bridge decks by the GPR technique, *Proc. of the 7th International Conference on Short and Medium Span Bridges*, Montréal, August 23-25, 6 p.

GHEORGHIU, C., BOCKSTAEEL, D., RHAZI, J., LABOSSIERE, P. (2006) Experimental and theoretical natural frequencies of vibration for fatigued concrete beams with FRPS, *Proc. of the 7th International Conference on Short and Medium Span Bridges*, Montréal, August 23-25, 6 p.

RHAZI, J., DOUS, O. (2006) Condition assessment of reinforced concrete bridge decks: the GPR versus the Half-cell potential technique, *Proc. of the 6th Int. Symposium on NDT in Civil Engineering*, St-Louis, August 15-18, 6 p.

SBARTAÏ, Z.M., LAURENS, S., RHAZI, J., BALAYSSAC, J.P., G. ARLIGUIE, G. (2005) Non destructive assessment of corrosion risks By using radar and electrical resistivity measurements: Laboratory experimentation and on-site investigation, *Proc. Of the International Congress on Construction Rehabilitation and Sustainable Development*, Alger (Algérie), 3-4 mai, 10 p.

SBARTAÏ, M., LAURENS, S., BALAYSSAC, J-P., ARLIGUIE, G., BALLIVY, G. (2005) Non destructive evaluation of concrete moisture using radar direct wave signal: laboratory test and case study, *International Conference on Concrete Repair, Rehabilitation and Retrofitting ICCRRR2005*, Cape Town, South Africa.

RIVARD, P., SAINT-PIERRE, F., BALLIVY, G., SAURIOL, B. (2004) Ultrasonic methods applied for assessing the progression of alkali-silica reaction in concrete, *Proceedings, 12e Conférence internationale sur les RAG*, Beijing, Chine, octobre 2004, 973-982.

AL WARDANY R., RHAZI J., BALLIVY G., GALLIAS J. L., SALEH K. (2004) Use of Rayleigh wave methods to detect near surface concrete damage, *Proc. of the 16th World Conference on Non Destructive Testing*, Montréal, Canada, 30 août-3 septembre, 7 p.

RHAZI, J., DOUS, O., KAVEH, S. (2004), Detection of fractures in concrete by the GPR technique, *Proc. of the 16th World Conference on Non Destructive Testing*, Montréal, Canada, 30 août-3 sept., 5 p.

SAINT-PIERRE, F., RIVARD, P., SAURIOL, B., BALLIVY, G. (2004) Étude de l'évolution de la réaction alcalis-silice par méthodes ultrasoniques, *11e Colloque sur la progression de la recherche québécoise portant sur les ouvrages d'art*, Université Laval, Québec, 12 p.

SAINT-PIERRE, F., RIVARD, P., SAURIOL, B., BALLIVY, G. (2004) Étude de l'évolution de la réaction alcalis-silice par méthodes ultrasoniques, *11e Colloque sur la progression de la recherche québécoise portant sur les ouvrages d'art*, Université Laval, Québec, 12 p.

BALLIVY, G., FAUCHER, C., RIVARD, P., GRAVEL, C., LALONDE, G., VEILLEUX, M. (2003) Measurements of tensile stress by cutting in trunnion anchor rebars embedded in spillway's piers and development of a new retensioning system, *21e congrès de l'ICOLD*, Montréal, juin 2003, 945-958.

RIVARD, P., BALLIVY, G, RHAZI, J., AL-WARDANY, R., GUISSI, G., DOUS, O. (2003) Suivi et caractérisation de la RAG par méthodes non destructives, *10e Colloque sur la progression de la recherche québécoise portant sur les ouvrages d'art*, Université Laval, Québec, 8 p.

RHAZI, J., DOUS, O., BALLIVY, G., LAURENS, S., J.-P. BALAYSSAC, J.-P., (2003), Non destructive health evaluation of concrete bridge decks by GPR and half potential techniques, *6th Int. Conf. on Nondestructive Testing in Civil Engineering*, Berlin, 16-19 septembre, 6 p. 14

- LAURENS, S., BALAYSSAC, J.-P., RHAZI, J., ARLIGUIE, G. (2003) Evaluation of concrete moisture by NDT techniques, *Proc. of the 6th Int. Conf. on Nondestructive Testing in Civil Engineering*, Berlin, 16-19 septembre, 12 p.
- RIVARD, P., FAUCHER, C., GRAVEL, C., BALLIVY, G., VEILLEUX, M. (2002) Développement d'une méthode de mesure des contraintes dans les barres d'armature d'un ouvrage atteint de RAS, *9e Colloque sur la progression de la recherche québécoise portant sur les ouvrages d'art*, Université Laval, Québec, 9 p.
- BALLIVY, G., PERRET, S., RHAZI, J., D., LAPORTE, R., GAGNON, E. (2001) Rehabilitation of hydraulic masonry heritage structures: Injection of special cement-based grouts and tomographic control, *Proceedings of STREMAH 2001*, C.A. Brebbia, ed., Bologna, Italie, 527-536.
- RIVARD, P., GRAVEL, C., BALLIVY, G. (2001) Evaluating the residual expansive potential of concrete dam affected by alkali-silica reaction, *Comptes rendus du Congrès annuel de l'Association canadienne des barrages*, Fredericton (NB) 30 sept. – 4 oct., 161-166.
- BALLIVY, G., PERRET, S., RHAZI, J., PALARDY, D., LAPORTE, R., GAGNON, E. (2001) Rehabilitation of hydraulic masonry heritage structures: injection of special cement-based grouts and tomographic control, *Proc. Of the 7th International Conference STREMAH 2001 Structural Studies, Repairs and Maintenance of Historical Buildings*, 28 – 30 May, Bologna (Italie), 10 p.

6 Références

1. Guissi, G. (2004), Contribution à l'étude des corrélations entre les variations de résistivité électrique et les variations de la résistance à la compression du béton, mémoire de maîtrise, Département de génie civil, UdeS, 94 p.
2. Filali, B. (2004), Étude des propriétés diélectriques du béton par sonde coaxiale et par antenne radar, mémoire de maîtrise, Département de génie civil, UdeS, 152 p.
3. B. Filali., Rhazi, J., Ballivy, G. (2006), Mesure des propriétés diélectriques du béton par une large sonde coaxiale à terminaison ouverte, *Revue Canadienne de Physique*, 14 p., (sous-presse).
4. A. Darabi, (2004), Facteurs affectant les propriétés thermiques du béton. Rapport d'essais. Département de génie civil, UdeS, 26 p.
5. Rivard, P., Ballivy, G., El-Malki, T., Rousseau, S. (2006), Relationships between physical and mechanical properties of concrete affected by alkali-silica reaction: application in field, accepté, 7th CANMET/ACI Conference on durability of concrete.
6. Al-Wardany, R. (2005), Caractérisation non destructive des structures en béton et des chaussées au moyen des ondes dispersives de Rayleigh et de Lamb, thèse de doctorat, Département de génie civil, UdeS, 150 p.
7. Al Wardany R., Ballivy G., Gallias J. L., Rhazi J., Saleh K. (2005) , Estimation of near surface concrete damage by Rayleigh wave NDT methods, *ACI Materials Journal* (en révision), 13 p.
8. J. Rhazi (2006), Evaluation of concrete structures by the acoustic tomography technique, *Structural Health Monitoring Journal*, accepté (mars 2006), 22 p.
9. Rivard, P., Saint-Pierre, F., Ballivy, G., Sauriol, B. (2004), Ultrasonic methods applied for assessing the progression of alkali-silica reaction in concrete, 12e Conférence internationale sur les RAG, Beijing, Chine, octobre 2004, p.973-982F.
10. Saint-Pierre, P. Rivard, B. Ballivy, Ultrasonic spectral analysis of concrete damaged by alkali-silica reaction, soumis à *Cement and Concrete Research*, septembre 2005.
11. J. Rhazi, J., Dous, O., Kaveh, S. (2004), Detection of fractures in concrete by the GPR technique, *Proceedings of the 16th World Conference on Non Destructive Testing*, Montréal, Canada, August.
12. Rhazi, J, Dous, O., Saleh, K., Tremblay, S. (2005), Détection des vides par thermographie infrarouge et des fissures par radar, 12e Colloque sur la progression de la recherche québécoise portant sur les ouvrages d'art, Université Laval, Québec, 10 p.
13. Al Wardany, R., Ballivy, G., Saleh, K., Rhazi, J., Gallias, J.L. (2004) Near Surface Characterization of Concrete Structures Using Rayleigh Waves, 2004 Joint Assembly, American Geophysical Union, Montreal (Qc), Canada.

14. J. Rhazi, S. Laurens, O. Dous (2006), Non-destructive testing of reinforced concrete bridge decks by the GPR technique, the 7th International Conference on Short and Medium Span Bridges, Montréal, 23-25 août, accepté, 6 p.
15. Rhazi, J., Laurens, S., J.-P. Balayssac, J.-P., Ballivy, G. (2003), Non destructive health evaluation of concrete bridge decks by GPR and half potential techniques, 6th Int. Conf. on Nondestructive testing in civil engineering, Berlin.
16. Rhazi, J., Dous, O., Gosselin, F., Bertrand, L. (2005), Auscultation des dalles des tabliers des ponts par radar, potentiel de corrosion et résistivité électrique : cas des structures P-14774, P-15500 P-14925 P-14927 P-14929 P-14922 et P-14919. Rapport GRAI GR-05-02-01-07, 92 p.
17. J. Rhazi, O. Dous (2006), Condition assessment of existing concrete bridge decks: The half-cell potential versus GPR. The 6th Int. Conf. of NDT in Civil Engineering, august 14-18, soumis.
18. Sbartaï, Z.M., Laurens, S., Rhazi, J., Balayssac, J.P., G. Arliguie, G. (2005), Non Destructive Assessment of Corrosion Risks By Using Radar And Electrical Resistivity Measurements: Laboratory Experimentation and On-Site Investigation, Proc. Of the Int. Cong. on Construction Rehabilitation and Sustainable Development, Alger (Algérie), 3-4 mai, 10 p.
19. Al Wardany R., Rhazi J., Ballivy G., Gallias J. L., Saleh K. (2004), Use of Rayleigh wave methods to detect near surface concrete damage, Proceedings of the 16th World Conference on Non Destructive Testing, Montréal, Canada.
20. S. Kodjo, P. Rivard. F. Cohen-Tenoudji, J.L. Gallias, Evaluation of concrete damages due to reaction alkali silica with nonlinear acoustics techniques: Development of a new nonlinear method, soumis à 2nd RILEM Symposium on Advances in concrete trough science and engineering, Québec, septembre 2006.
21. C. Ostrowski (2005), Auscultation des ouvrages en béton par thermographie infrarouge : application aux câbles de précontrainte, thèse de doctorat, Département de génie civil, UdeS, 176 p.
22. Ostrowski, C., Defer, D., Antczak, E., Ballivy, G. (2003) Couplage de mesures infrarouges et fluxmétriques pour le contrôle non destructif de câbles de précontrainte en génie civil, Article CIFQ2003, VIe Colloque interuniversitaire Franco-québécois, Thermique des systèmes, 26-18 mai, Québec.
23. Ostrowski, C., Defer, D., Rhazi, J., Ballivy, G. (2002), Application de la thermographie infrarouge à différents types d'ouvrages de génie civil, 9e Colloque sur la progression de la recherche québécoise sur les ouvrages d'art, Université Laval, Québec, 8 p.