

Réhabilitation à l'aide de matériaux composites de colonnes affectées par les réactions alcalis-granulats

Hugo Pelletier, ing. jr., étudiant à la maîtrise
Pierre Labossière, ing., Ph.D., professeur
Département de génie civil
Faculté de génie
Université de Sherbrooke

Résumé

Les réactions alcalis-granulats (RAG) sont une forme sévère de dégradation qui affecte bon nombre de structures routières au Canada et au Québec. Les RAG sont des réactions chimiques qui se développent dans la solution interstitielle du béton entre la poudre de ciment et les granulats. Les réactions ont pour effet de faire gonfler les bétons atteints créant ainsi des contraintes irréversibles dans ceux-ci comme dans les renforcements d'acier qu'ils renferment. Cette forme de détérioration prématurée perturbe les propriétés mécaniques, l'état de service, et la stabilité des éléments structuraux des ouvrages où elle sévit.

Dans un contexte de restriction budgétaire, il n'est pas avantageux de remplacer les structures ne respectant plus les normes actuelles. Des techniques de réhabilitation doivent par conséquent être mises de l'avant afin de rendre les ouvrages actuels plus résistants et surtout plus sécuritaires, tout en prolongeant leur durée de vie. Les méthodes correctrices et de réhabilitations utilisées jusqu'à ce jour ne semblent pas aussi avantageuses que pourrait être un confinement à l'aide de matériaux composites. Par conséquent, ce projet proposera une technique pour la réhabilitation à l'aide de matériaux composites de colonnes de béton armé affectées par les réactions alcalis-granulats.

Ainsi, 117 colonnes circulaires et 48 colonnes carrées ont été fabriquées et entreposées dans un environnement favorisant l'apparition prématurée des RAG. Les paramètres à l'étude ont été la présence d'armatures ou non, le type de confinement et le niveau de réactivité des granulats. Le délai entre la fabrication des colonnes et l'installation du confinement avec des PRF était aussi à l'étude.

L'efficacité du confinement vis-à-vis l'expansion a été mesurée périodiquement à l'aide de micromètres. Lorsque les spécimens ont atteint leur expansion maximale, les colonnes ont été retirées de leur milieu de vieillissement pour être auscultées à l'aide de méthodes ultrasoniques. Ces mesures permettent de déterminer si le confinement avait vraiment permis d'éviter la propagation des fissures, et par conséquent l'expansion des spécimens. Pour conclure l'analyse, des essais de compression ont été faits sur les colonnes. Des résultats typiques du projet sont présentés dans l'article et les résultats de l'étude seront exposés lors de la conférence.

Mots-clés : Réaction alcalis-granulats, polymères renforcés de fibre, confinement, renforcement et réhabilitation

1.0 Introduction

La gestion des structures de béton affectées par les réactions alcalis-granulats (RAG) est un problème préoccupant pour les propriétaires d'ouvrages. Cet article présentera un programme de recherche expérimental mis sur pied afin d'étudier le comportement de colonnes de béton armé affectées par les RAG et confinées par des polymères renforcés de fibres. Ainsi, une introduction aux problèmes causés par les RAG ainsi que de divers projets s'y rattachant seront présentés. Ensuite un survol du programme expérimental et des résultats préliminaires sera fait. Les spécimens utilisés lors de l'étude sont des colonnes de petite échelle.

2.0 Réactions alcalis-granulats

Les réactions alcalis-granulats dans les bétons ont pour effet de dégrader rapidement et de façon irréversible les ouvrages de béton armé. Les RAG sont un problème mondial. Au pays, des cas de RAG ont été rapportés dans toutes les provinces, cependant la majeure partie est regroupée dans les provinces de l'est qui comptent plus de 1000 structures affectées. À l'échelle du Québec, en raison de la géologie caractéristique de la province et de l'utilisation dans le passé de ciments à haute teneur en alcalis, plusieurs structures de béton sont affectées de façon plus ou moins importante par les réactions alcalis-granulats.

Les RAG sont des réactions chimiques qui se développent dans la solution interstitielle des bétons entre le ciment et les granulats. Ces réactions produisent un produit de réaction visqueux appelé gel alcalis-silice. Ce gel, par absorption d'eau augmente de volume. Par la suite, lorsque le gel n'arrive plus à se déplacer librement à travers les pores du béton, des contraintes de tension se forment dans la pâte de ciment localisée autour des granulats. La microfissuration apparaît lorsque les pressions localisées, de l'ordre de 6 à 7 MPa, deviennent plus grandes que la résistance en tension de la pâte de ciment, d'environ 2 à 3 MPa, créant ainsi la décohésion de l'interface entre celle-ci et les granulats. Par conséquent, la réaction cause des détériorations prématurées des éléments de béton affecté commencent par l'expansion interne suivie par l'éclatement et de la fissuration du béton. Par la suite, les ouvertures faites par ses cassures du béton, aide à la corrosion de l'acier d'armature de même qu'aux problèmes de gel/dégel, mouillage/séchage et de sulfatation du béton. Les symptômes visibles communs des RAG sont la fissuration, l'exsudation de gel, l'écaillage du béton. [Fournier et Bérubé, 2000]

Les RAG ne se déclenchent pas dans toutes les structures de béton armé. Trois éléments de bases doivent être réunis afin d'obtenir des réactions alcalis-granulats dans les ouvrages de béton armé. En effet, le béton doit contenir un apport critique de granulats réactifs, une forte teneur en alcalis dans la solution interstitielle et de l'humidité en quantité suffisante (autour de 80% à 85%) [Fournier et Bérubé 2000]. Si un des trois n'est pas présent, la réaction n'aura pas lieu.

Des restrictions mécaniques telles, l'acier de renforcement, le renforcement externe et le confinement réduisent de façon significative le gonflement des bétons atteints de RAG. Si le gonflement est retenu dans une direction, il est normalement compensé par une expansion plus importante dans les directions non contraintes. En effet, selon l'étude menée par Smaoui [2005], la présence d'armature diminue l'expansion parallèle à celle-ci et la diminution est d'autant plus importante que le pourcentage d'armature est élevé et que les granulats sont moins réactifs. Lors d'une étude sur le comportement structural de poutres affectées par les RAG [Multon, 2005], il a été vérifié que l'expansion se fait selon la théorie Navier-Bernoulli, soit que les sections planes restent planes. De même, la déflexion de la poutre est représentative de la rotation de la section. Il a été prouvé que le renforcement longitudinal et les étriers ont un effet sur les contraintes et les déformations. En outre, pour des éléments de béton sans restriction mécaniques, les pressions extérieures générées par les réactions alcalis-granulats varient de 1 à 10 MPa.

Les RAG affectent les propriétés structurales des ouvrages de béton armé où elles sévissent. En effet, la microfissuration du béton crée une détérioration prématurée des ouvrages, un changement dans les propriétés de résistance des matériaux et des contraintes irréversibles autant dans le béton que dans l'acier. Pour sa part, le gonflement induit par la microfissuration peut engendrer des problèmes aux composantes mécaniques des ouvrages et peut aussi créer des problèmes de stabilité structurale.

Afin de prévenir les RAG dans les structures neuves quelques mesures simples peuvent être prises comme la sélection de granulats non-réactif, l'utilisation de ciment à faible teneur en alcalis et d'ajouts cimentaires. L'application d'un scellant ou d'un revêtement en surface peut arrêter et l'infiltration d'alcalis [Fournier et Bérubé, 2000]. L'application rapide d'un revêtement est très efficace pour aider aux performances structurales de poutres affectées de RAG [Hamada et coll., 2004]. Cependant, dans le cas de structures gravement affectées un renforcement structural est nécessaire. Dans ces cas, après des réparations de surfaces, il peut être nécessaire de renforcer les ouvrages atteints des réactions alcalis-granulats afin d'assurer la sécurité structurale. L'encapsulation, la postcontrainte, le renforcement par plaques d'aciers sont des méthodes déjà reconnues pour la réhabilitation des ouvrages affectés par les RAG.

L'utilisation des polymères renforcés de fibres comme technique de réhabilitation structurale des structures affectées des réactions alcalis granulats possède l'avantage d'être facilement manœuvrable sur chantier comparativement aux autres méthodes. Entre autres, une étude de renforcement à l'aide de matériaux composites de poutres affectés par les RAG a déjà été réalisée au département de génie civil de l'Université de Sherbrooke [Lacasse et al., 2003]. L'objectif de l'étude était d'étudier la durabilité et l'efficacité des matériaux composites comme technique de renforcement de poutres de béton armé affectées par les RAG. Les résultats de cette étude ont prouvé que les paramètres ayant le plus d'influence sur l'expansion des poutres sont la réactivité des granulats et la présence de renfort de matériaux composite. L'expansion causée par les RAG n'est pas la même dans toutes les directions, elle dépend de l'orientation et du ratio du renforcement. De plus, les matériaux composites augmentent la résistance en flexion des poutres. Ce gain dépend de l'expansion causée par les RAG et de la durée de l'exposition des poutres aux conditions expérimentales d'accélération des RAG. Néanmoins, un manque d'information spécifique au sujet de la réhabilitation par matériaux composites de colonnes de béton armé affectés par les RAG a initié le présent projet.

Cependant, il avait déjà été prouvé que l'utilisation du confinement par PRF était capable de rehausser la pleine capacité des colonnes de béton armé sévèrement endommagées. Le confinement permet l'augmentation de la ductilité et améliorer la capacité portante des colonnes [Demers and Neale, 1999]. L'effet de confinement est directement en lien avec la section des colonnes et il a été prouvé que le confinement le plus efficace était obtenu avec une section circulaire [Rochette and Labossière, 2000]. De même, puisque la corrosion de l'acier de renforcement est un processus expansif, d'autres projets de recherches ont démontré que le chemisage par PRF de colonnes endommagées par la corrosion diminue le taux de corrosion et augmente la ductilité et la résistance de celles-ci [Pantazopoulou and al., 2001].

Selon ses projets antérieurs, il fut anticipé qu'un confinement avec PRF pouvait aussi être fait afin de réparer des colonnes de béton armé affectées par les RAG. Ainsi, l'objectif du projet est d'évaluer si un confinement peut compenser pour les effets néfastes de RAG dans des colonnes de béton armé.

4.0 Échantillons à l'étude

Afin de permettre l'étude de plusieurs paramètres pouvant influencer les résultats de l'étude, 165 échantillons ont été fabriqués en variant la forme de la section, les mélanges de béton, la présence ou non d'acier de renforcement, les matériaux composites pour le confinement et les conditions d'exposition de chaque échantillon.

4.1 Formes et renforcement des échantillons

Deux types de colonnes à échelle réduite ont été fabriqués, soit des colonnes de section circulaire et de section carrée. Dans chacun des cas, la hauteur des colonnes était de 300 mm et elles avaient un diamètre ou une largeur de 150 mm. Comme le renforcement joue un rôle important dans la limitation de l'expansion de RAG, les colonnes étaient soit armées d'acier ou non-armées. Les barres d'acier non crénelées utilisées dans la fabrication de l'armature des colonnes étaient faites d'acier de nuance 1018 laminées à froid. Dans le cas des échantillons de béton armé, le renforcement longitudinal des colonnes circulaires était constitué de sept barres no 3M, tandis que dans le cas des sections carrées il était de quatre barres no 5M. Quatre étriers de no 3M ont été utilisés dans les deux cas. De petites colonnes ont été utilisées tout d'abord pour pouvoir étudier plusieurs combinaisons de paramètres, et aussi parce que les RAG se développent plus rapidement dans des échantillons de faible dimension. La Figure 1 présente les sections des colonnes de béton armé.

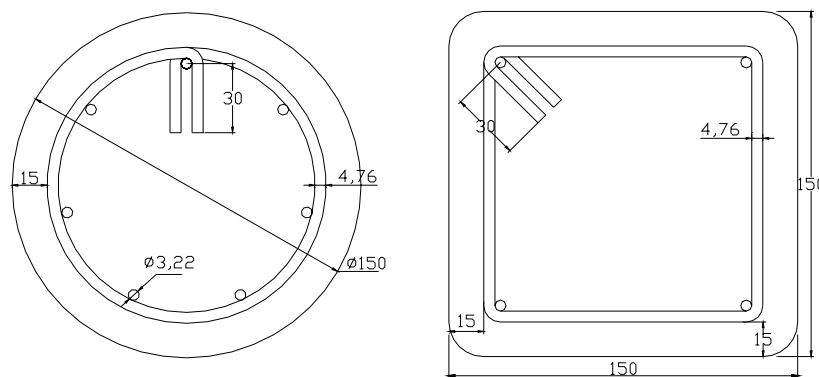


FIGURE 1: SECTIONS DES ÉCHANTILLONS

4.2 Mélanges de bétons utilisés

De façon à assurer l'apparition des réactions alcalis-granulats, des granulats réactifs et des granulats moyennement réactifs ont été utilisés dans la conception des mélanges de bétons. De même, afin d'accélérer le processus de réactions, un alcali, soit l'hydroxyde de sodium (NaOH , $2,5 \text{ kg/m}^3$), a été ajouté aux mélanges à l'étude. Suivant l'exemple d'un projet antérieur [Lacasse and al., 2003], les deux types de granulats qui ont servi dans l'étude ont par le passé été utilisés dans la conception de structures démontrant de nos jours des signes de réactivité. Aujourd'hui, ces granulats sont proscrits dans les ouvrages de béton. Les granulats réactifs provenaient de la carrière *Spratt* d'Ottawa (Ontario, Canada) et avaient des diamètres de 5-10 millimètres (mm). Ces granulats sont bien connus dans la littérature des RAG. Les granulats moyennement réactifs pour leur part, avaient des diamètres similaires et venaient de la carrière *Sintra* de North Hatley (Québec, Canada). Ces granulats pour leur part sont moins réactifs que les premiers, mais sont tout de même proscrits dans les ouvrages de béton de la région de Sherbrooke. Du ciment Portland type 10 possédant une teneur en alcalis de 0,82 % à été utilisé avec un ratio

Eau/Ciment (E/C) de 0,44. Une cure de 28 jours en immersion dans l'eau avait été appliquée sur l'ensemble des échantillons à la suite du décoffrage. Le tableau 1 présente les proportions des deux différents mélanges de béton utilisés.

TABLEAU 1 : PROPORTION DES MÉLANGES UTILISÉS

| Constituants des mélanges | Mélanges de béton | |
|------------------------------|------------------------|------------------------|
| | Réactif | M-réactif |
| Ration Eau/Ciment (E/C) | 0,44 | 0,44 |
| Ciment* | 420 kg/m ³ | 420 kg/m ³ |
| Eau | 184,8 mL | 184,8 mL |
| Sable | 653 kg/m ³ | 653 kg/m ³ |
| Granulats | 974 kg/m ³ | 1012 kg/m ³ |
| Agent entraîneur d'air | 208 mL | 208 mL |
| NaOH | 2,5kg/m ³ | 2,5kg/m ³ |
| Na ₂ O équivalent | 5,9 kg/m ³ | 5,9 kg/m ³ |
| Poids total | 2235 kg/m ³ | 2273 kg/m ³ |

* Teneur en alcalis de 0,82%

4.3 Matériaux composites

Un total de 111 échantillons ont été confinés par deux couches de PRF, soit 39 colonnes circulaires confinées avec de la fibre de carbone, 39 colonnes circulaires confinées avec de la fibre de verre, 21 colonnes carrées confinées avec de la fibre de carbone, 12 colonnes carrées confinées avec de la fibre de verre. Selon les résultats obtenus par un précédent projet de recherche [Lacasse et al., 2003], les propriétés des matériaux composites ne sont pas altérées par le type d'exposition utilisé dans ce programme de recherche.

4.4 Conditions d'exposition

Certains échantillons, 105 exactement, ont été exposés à un environnement permettant d'accélérer l'apparition et d'amplifier l'effet des réactions alcalis-granulats dans les mélanges de béton. Ces échantillons étaient enrobés dans un tissu absorbant humide et laissé dans un bassin hermétique où la température était maintenue à 38 degrés Celsius (°C) et à 100 % d'humidité relative. La température du bassin était maintenue à l'aide d'un radiateur électrique portable contrôlé par un thermostat. L'humidité relative a été sélectionnée afin d'éviter un lessivage d'alcalis que pourrait occasionner une immersion complète dans l'eau. Pour ce faire, les échantillons étaient périodiquement retirés du bassin pour arroser les tissus absorbants les recouvrant.

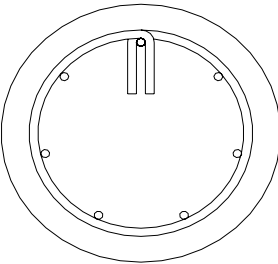
4.5 Distribution des échantillons

Dans le présent projet de recherche, 117 colonnes circulaires et 48 colonnes carrées à échelle réduite ont été construites. Il y avait trois spécimens identiques pour chacune des 55 combinaisons de paramètres possibles. Ces proportions ont été sélectionnées afin d'être cohérentes avec des travaux expérimentaux antérieurs [Lacasse et al., 2003].

Le tableau 2 présente les différents paramètres à l'observation sur les 117 colonnes circulaires. Puisque le renforcement interne est reconnu comme facteur influençant l'expansion des RAG, 69 colonnes ont été conçues avec des armatures internes et 48 sans renforcement internes. De façon à vérifier l'influence du degré de réactivité des granulats, 69 échantillons ont été faits avec des granulats réactifs et 48 avec des granulats moyennement réactifs. Il est bon de mentionner ici que plusieurs colonnes possèdent un renforcement interne et des granulats réactifs puisque ce sont les paramètres qui représentent le mieux la réalité des structures en service. Afin d'évaluer la contribution probable de différents types de confinement, 13 spécimens n'avaient pas de confinement, 13 spécimens étaient enrobés avec de la fibre de carbone et 13 avec de la fibre de verre. Ainsi, une comparaison de l'efficacité entre les deux PRF peut être faite. La période où le confinement par matériaux composites a été effectuée variait aussi : (1) au début de l'exposition; (2) après six mois d'exposition; (3) à la fin de la période d'exposition. Le paramètre de six mois d'exposition a été utilisé puisque, considérant la nature des granulats réactifs, cette période correspond à un état d'endommagement significatif du béton. Six colonnes de béton non renforcé n'ont pas été exposées aux conditions de vieillissement afin de caractériser les mélanges de bétons n'ayant pas été endommagés.

Le tableau 3 illustre les paramètres à l'étude pour les 48 colonnes carrées. De la même façon que pour les colonnes circulaires, 30 colonnes de béton armé et 18 de béton non armé ont été construites, mais seulement avec des granulats réactifs. Les mêmes paramètres que les colonnes circulaires ont été étudiés pour ces colonnes carrées.

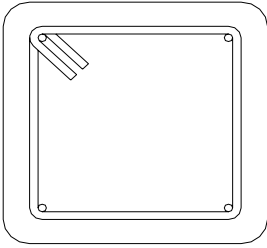
TABLEAU 2: ÉCHANTILLONS CIRCULAIRES



| Confinement | Tests | ARMÉ | | | | | | NON-ARMÉ | | | | | |
|-------------------|--------|-----------|---------|-------|--------------|---------|-------|-----------|---------|-------|--------------|---------|-------|
| | | RÉACTIF | | | MOY. RÉACTIF | | | RÉACTIF | | | MOY. RÉACTIF | | |
| | | Aucun PRF | Carbone | Verre | Aucun PRF | Carbone | Verre | Aucun PRF | Carbone | Verre | Aucun PRF | Carbone | Verre |
| Début | Début | A00 | B00 | C00 | D00 | E00 | F00 | G00 | H00 | I00 | J00 | K00 | L00 |
| | 6 mois | A06 | B06 | C06 | | | | G06 | | | J06 | | |
| | 2 ans | A02 | B02 | C02 | D02 | E02 | F02 | G02 | H02 | I02 | J02 | K02 | L02 |
| 6 mois | 6 mois | | B66 | C66 | | | | | | | | | |
| | 2 ans | | B62 | C62 | | | | | | | | | |
| 2 ans | 2 ans | | B22 | C22 | | E22 | F22 | | | | | | |
| Aucune exposition | | | | | | | | GX | | | JX | | |

Note: Il y a trois spécimens identiques dans chaque cas.

TABLEAU 3: ÉCHANTILLONS CARRÉS



| Confinement | Tests | ARMÉ | | | | | | NON-ARMÉ | | | | | |
|-------------|--------|-----------|---------|-------|--------------|---------|-------|-----------|---------|-------|--------------|---------|-------|
| | | RÉACTIF | | | MOY. RÉACTIF | | | RÉACTIF | | | MOY. RÉACTIF | | |
| | | Aucun PRF | Carbone | Verre | Aucun PRF | Carbone | Verre | Aucun PRF | Carbone | Verre | Aucun PRF | Carbone | Verre |
| Début | Début | M00 | N00 | P00 | | | | Q00 | R00 | S00 | | | |
| | 6 mois | M06 | N06 | | | | | | | | | | |
| | 2 ans | M02 | N02 | P02 | | | | Q02 | R02 | S02 | | | |
| 6 mois | 6 mois | | | | | | | | | | | | |
| | 2 ans | | N62 | | | | | | | | | | |
| 2 ans | 2 ans | | N22 | | | | | | | | | | |

Note: Il y a trois spécimens identiques dans chaque cas.

5.0 Acquisition de données

Quatre méthodes ont été utilisées afin de caractériser l'effet des réactions alcalis granulats dans les colonnes. L'évolution de l'expansion du béton a été mesurée par des plots métalliques. La fissuration finale a été vérifiée par méthodes ultrasoniques. Et pour terminer, des essais de compression simple ont été effectués sur chaque échantillon afin de connaître leurs capacités structurales.

5.1 Caractérisation de l'effet des RAG par l'expansion des colonnes

Le gonflement du béton atteint de RAG est un effet physique qui permet de suivre la progression de l'endommagement. Ainsi, de façon à mesurer l'efficacité du confinement par rapport à l'expansion causée par les RAG, des plots métalliques avaient été installés à la surface des échantillons. Les plots sont en fait, des références fixées aux surfaces afin de connaître la variation entre deux points. Un total de 28 échantillons étaient munis de plots. Les choix ont été faits de façon à connaître l'expansion de différentes configurations de colonne et ainsi identifier les paramètres les plus influents. Dans le cas des échantillons circulaires, trois mesures différentes ont été prévues afin de vérifier les variations de diamètre (150 mm), hauteur (300 mm) ou allongement des côtés (250 mm). L'expansion des colonnes carrées était mesurée pour sa part sur les côtés parallèles dans le sens longitudinal seulement (250 mm). La Figure 2, présente la position des plots sur les deux types de colonnes à l'étude. Les Figures 3 et 4 illustrent les micromètres utilisés.

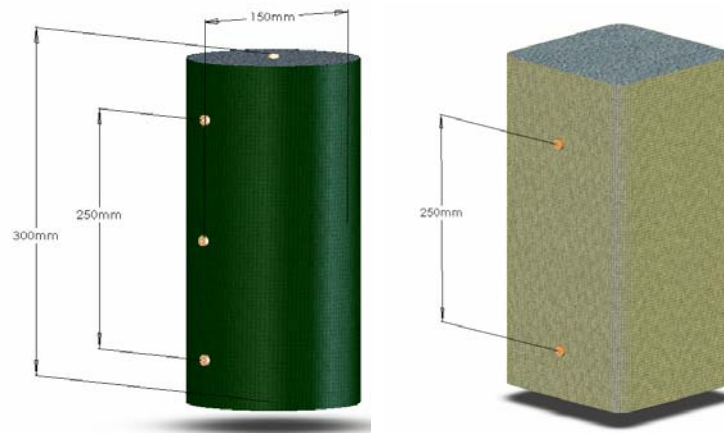


FIGURE 2 : POSITION DES PLOTS



FIGURE 3 : MICROMÈTRE « CÔTÉ »

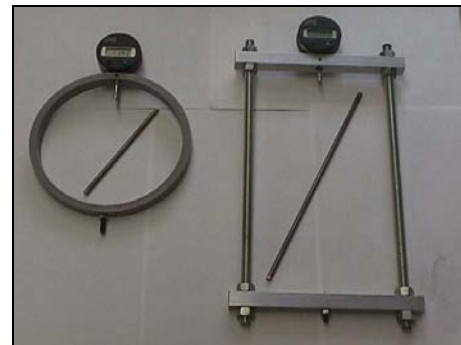


FIGURE 4 : MICROMÈTRE « RADIAL » ET MICROMÈTRE « HAUTEUR »

5.2 Caractérisation de l'effet des RAG par les méthodes ultrasoniques

Le mécanisme physique causant l'expansion des bétons affectés par les réactions alcalis-granulats est la création de réseau de microfissures par le gel expansif. Le degré de dégradation des bétons peut-être évalué de façon non destructive en mesurant un signal ultrasonique passant à travers les colonnes, puisque la présence de microfissures influence la réponse du signal à la sortie. Par conséquent, une méthode ultrasonique a été employée dans ce projet, soit la mesure des vitesses des ondes de compression et de cisaillement. Les mesures soniques ont été prises sur 54 colonnes circulaires, soit celles ayant passé toute la période d'exposition en bassin. Deux appareils ont été utilisés pour prendre les mesures, soit le TYCO ® et un montage constitué notamment d'un émetteur de signal numérique et d'un oscilloscope.

La vitesse des ondes de compression a été mesurée à l'aide du TYCO ® en respectant la norme ASTM C597-02. Cet instrument de chantier mesure uniquement les vitesses d'onde de compression en transmission directe. Par conséquent, nous obtenons avec cet instrument la vitesse que prend une onde à passer à travers les colonnes. La Figure 5 illustre l'appareil utilisé.



FIGURE 5 : ÉQUIPEMENT TYCO ®

La mesure des vitesses des ondes de compression et de cisaillement a été effectuée à l'aide d'un montage constitué d'un oscilloscope, un ordinateur portable, un émetteur de signal numérique et deux capteurs piézo-électriques comme l'illustrent les Figures 6 et 7. Le montage consiste à placer un capteur piézo-électrique à chaque extrémité de l'éprouvette, l'un jouant le rôle d'émetteur et l'autre de récepteur. Un signal numérique est envoyé par l'émetteur au premier capteur piézo-électrique qui produit un signal ultrasonique qui passe à travers la colonne de béton. Le signal est ensuite perçu par le récepteur et est numérisé grâce à l'oscilloscope numérique. Pour terminer, les données sont transférées à l'ordinateur portable pour l'acquisition. La norme ASTM D2845 régit la méthode utilisée dans le projet.



Figure 6 : Équipement nécessaire

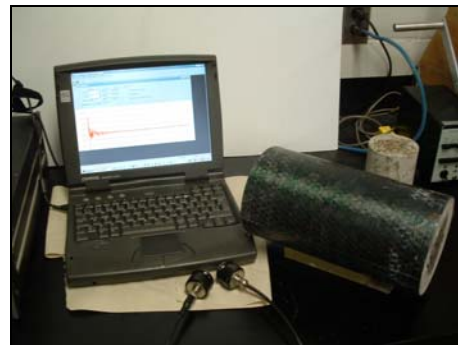


Figure 7 : Équipement nécessaire

5.3 Capacité structurale des colonnes : Essais de compression

Des essais de compression simple ont été effectués sur l'ensemble des spécimens afin d'évaluer de quelle façon un confinement à l'aide de matériaux composites peut compenser les effets néfastes des RAG du point de vue mécanique.

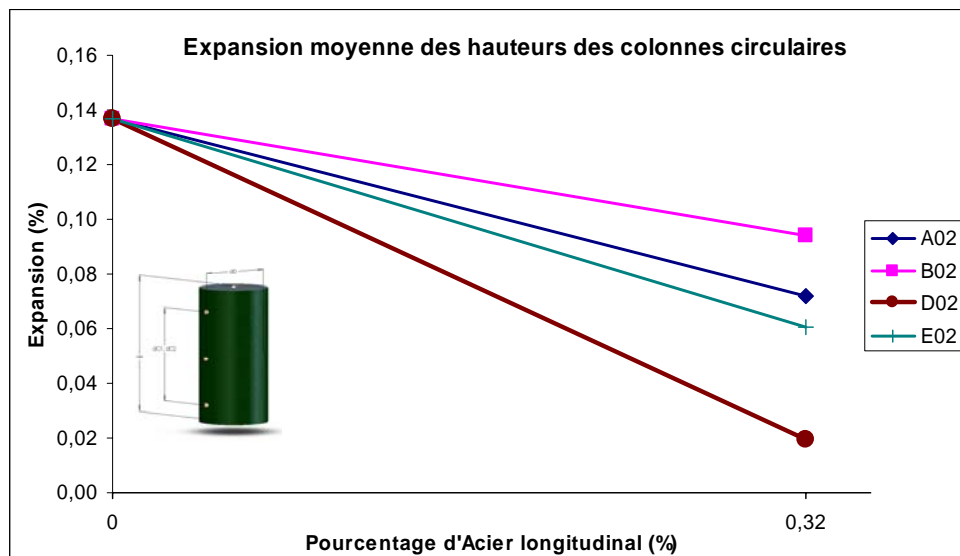
Les essais de compression ont été effectués sur une presse MTS de capacité de 4550 kN. Le taux de chargement en contrôle de déplacement était de 0,02 mm/sec jusqu'à la rupture des spécimens. Ce taux respecte les recommandations de la norme CSA A23.2-9C pour un cylindre de 150 mm de diamètre. Cependant, contrairement aux exigences normales, nous avons fait les essais en contrôle des

déplacements pour éviter une rupture brusque et fragile des échantillons. En plus de la cellule de charge, deux extensomètres mesuraient les déformations longitudinales et un LDVT mesurait les déformations radiales des colonnes en fonction du temps.

Résultats préliminaires

L'analyse des résultats expérimentaux est présentement en cours. Cependant, les analyses préliminaires de l'expansion, des mesures soniques seront présentées dans la partie suivante.

On remarque sur la Figure 8 que l'expansion de la hauteur diminue en fonction du pourcentage d'acier longitudinal. L'expansion de la hauteur est plus importante pour du béton réactif (A02 et B02) que pour du béton moyennement-réactif (D02 et E02). De même, le confinement par fibre de carbone (B02 et E02) a l'effet d'augmenter l'expansion de la hauteur des colonnes par rapport aux spécimens non confinés (A02 et D02). La réactivité des granulats utilisés a aussi un effet notable sur l'expansion de la hauteur des colonnes. On constate que le confinement par PRF a pour effet d'augmenter l'expansion de la hauteur par rapport au confinement par acier de renforcement. L'expansion des hauteurs diminue en fonction du confinement dans le cas du béton réactif, mais augmente pour le béton moyennement-réactif. Le fait qu'il n'y a pas de mesure de béton moyennement réactif sans acier et de béton moyennement-réactif avec acier et fibre de verre explique probablement cette augmentation.



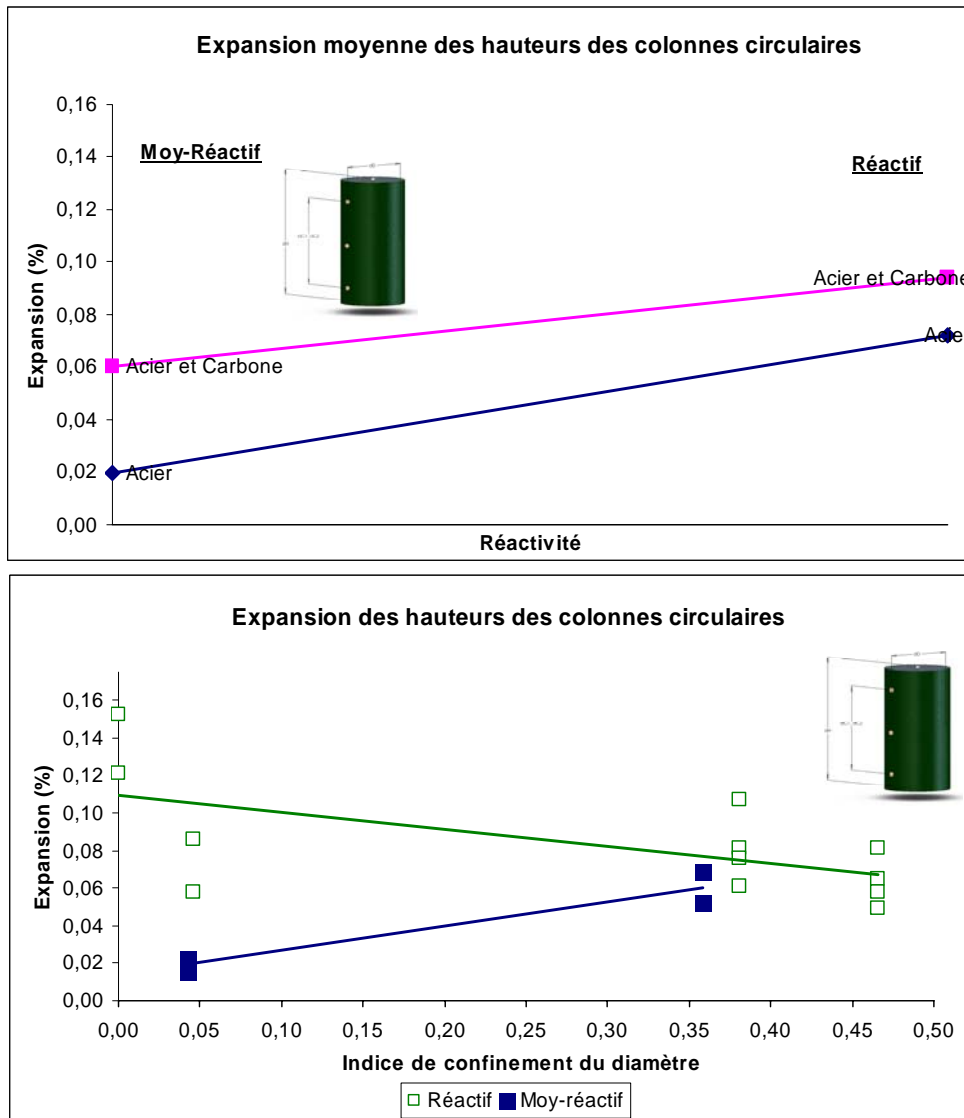
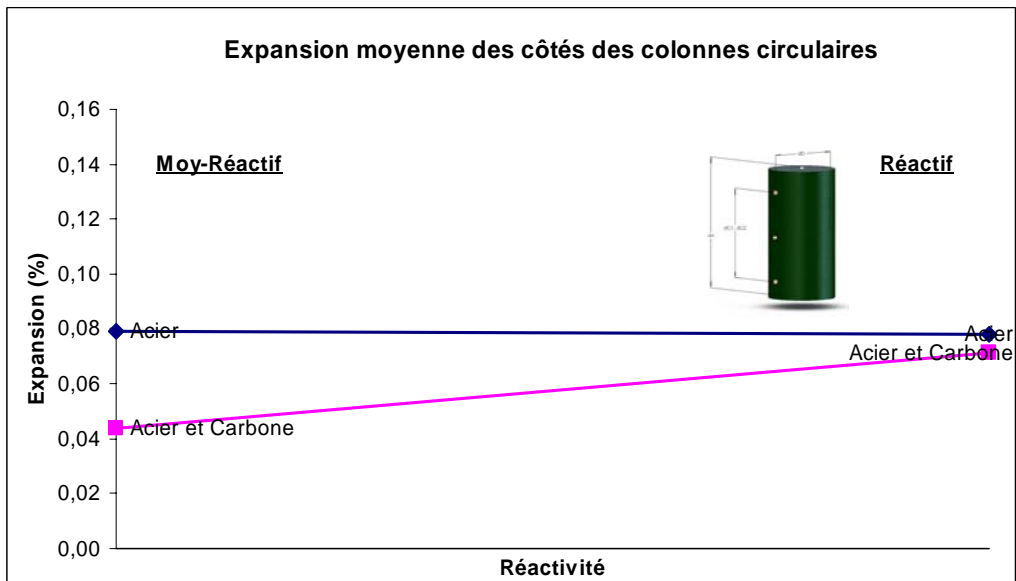
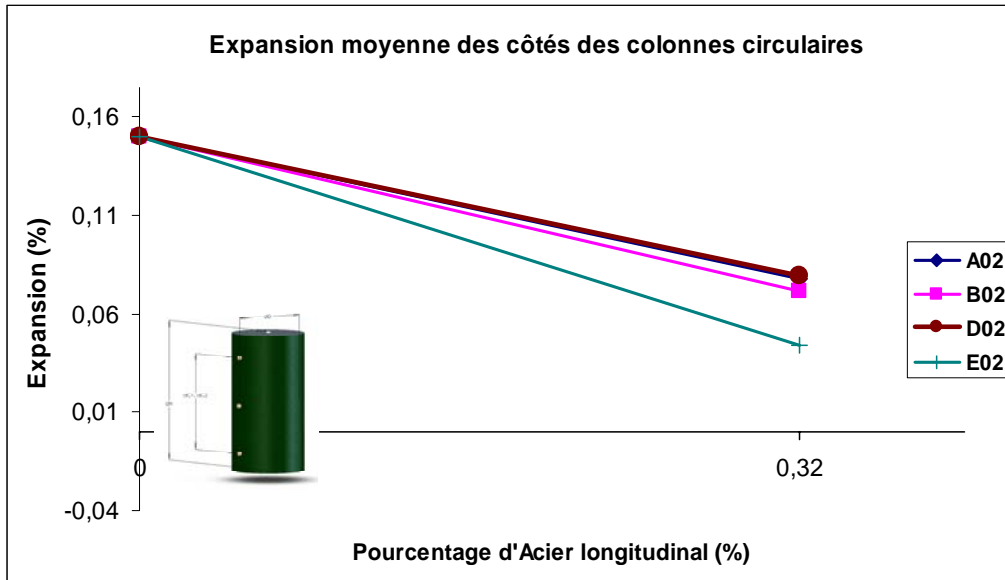


FIGURE 8 : RÉSULTATS D'EXPANSION DE LA HAUTEUR

Sur la Figure 9 on remarque que l'expansion longitudinale des côtés diminue en fonction du pourcentage d'acier longitudinal. L'expansion longitudinale des côtés est semblable pour du béton réactif et moyennement-réactif sans PRF (A02 et D02). Le confinement par fibre de carbone (B02 et E02) diminue l'expansion longitudinale des côtés par rapport aux spécimens non-confinés (A02 et D02). La réactivité des granulats utilisés a aussi un effet notable sur l'expansion longitudinale des côtés des colonnes. On constate que le confinement par PRF a pour effet de réduire l'expansion longitudinale des côtés par rapport au confinement par acier de renforcement. On remarque aussi une diminution de l'expansion longitudinale des côtés en fonction de l'indice de confinement pour les deux types de béton. La diminution est moins prononcée pour le béton moyennement-réactif.



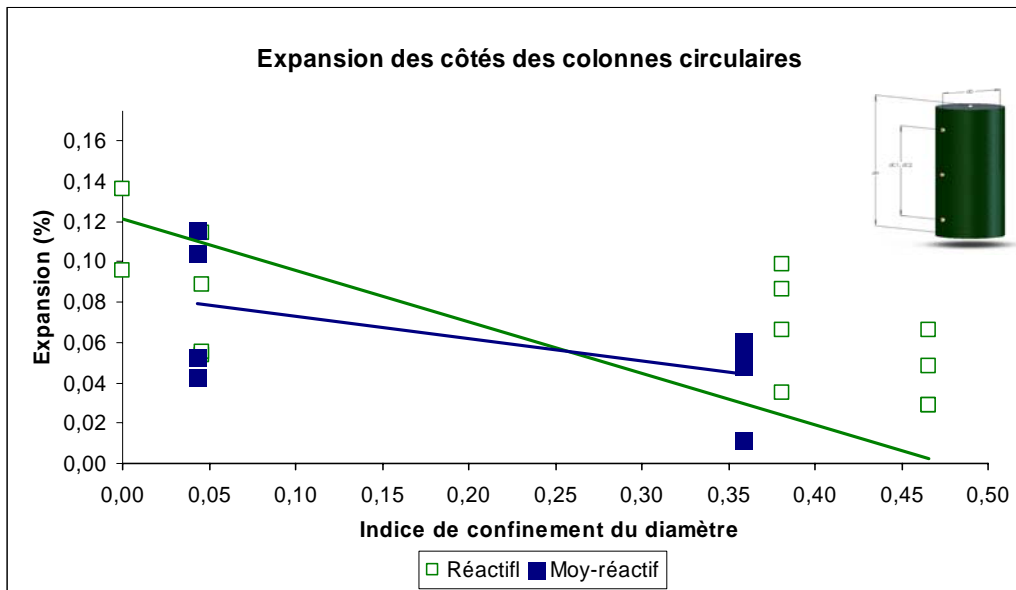
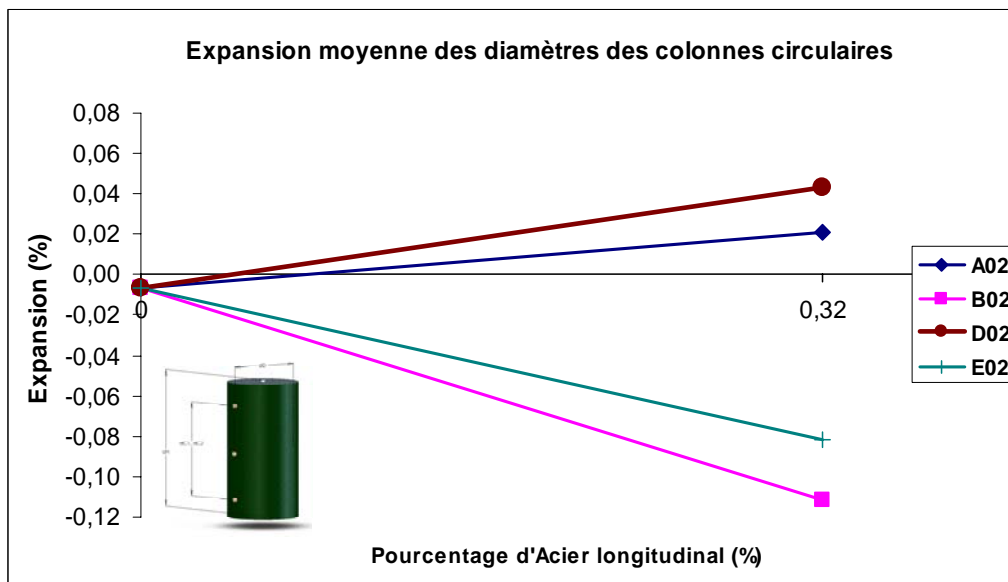


FIGURE 9 : RÉSULTATS D'EXPANSION LONGITUDINALE DES CÔTÉS

À partir des graphiques de la Figure 10 on observe que l'expansion du diamètre augmente en fonction du pourcentage d'acier longitudinal (A02 et D02). Cependant, la combinaison acier et fibre de carbone a un effet de confinement très important (B02 et E02). La réactivité des granulats utilisés a aussi un effet notable sur l'expansion du diamètre des colonnes. On constate que le confinement par PRF a pour effet de réduire l'expansion du diamètre par rapport au confinement par acier de renforcement. L'expansion du diamètre est similaire à celle des côtés, soit l'expansion diminue en fonction de l'indice de confinement, mais la diminution semble plus prononcée pour le béton moyennement-réactif. L'analyse de l'expansion du diamètre demeure incertaine pour l'instant et devra être approfondie en partie à cause des résultats des colonnes confinées par la fibre de carbone. La rigidité de la fibre semble avoir un effet significatif.



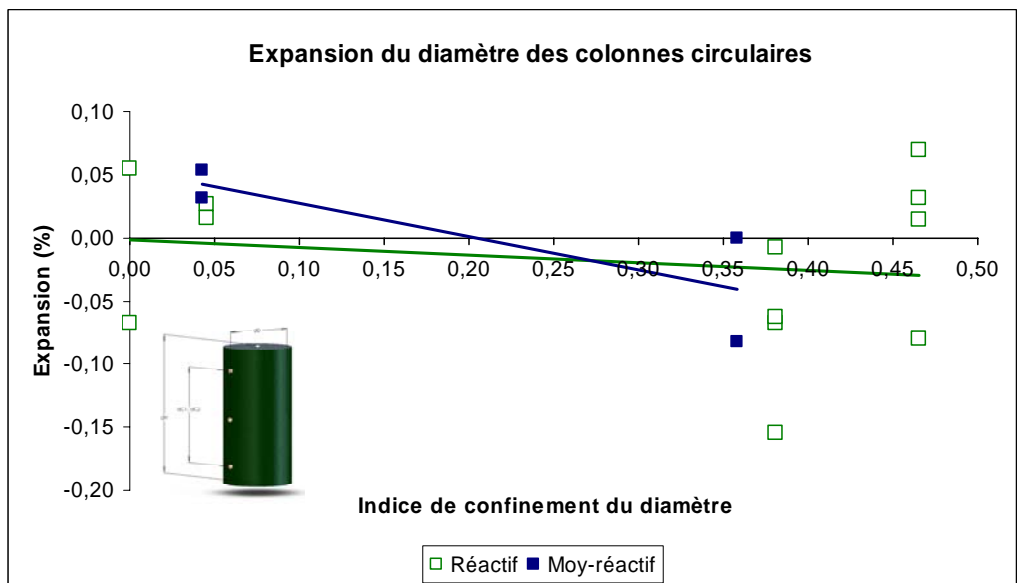
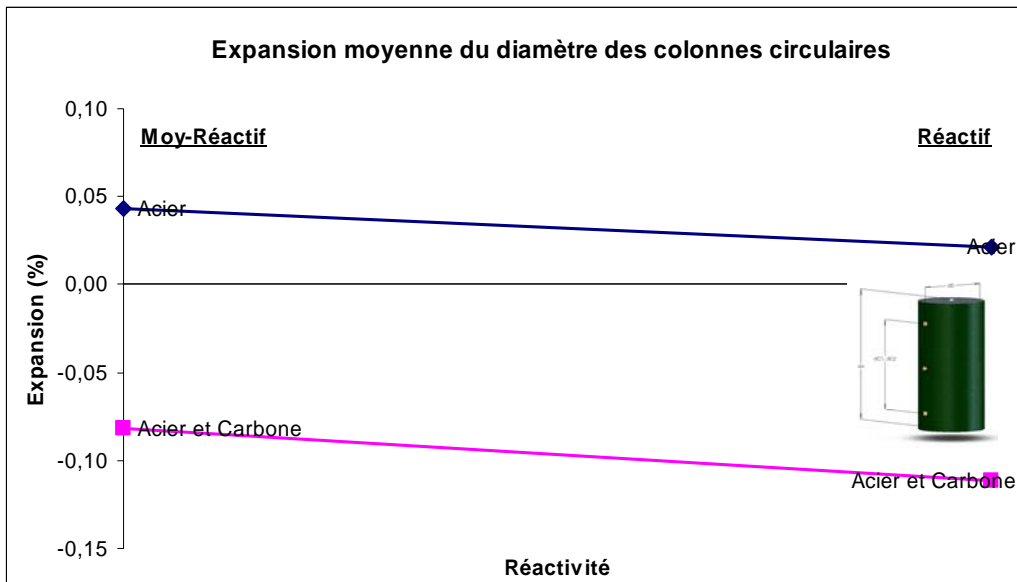


FIGURE 10 : RÉSULTATS D'EXPANSION DU DIAMÈTRE

Dans le cas des mesures ultrasoniques présentées à la Figure 11, on remarque que la vitesse de propagation de l'onde de compression primaire (TICO) augmente en fonction de l'indice de confinement. Les résultats du coefficient de Poisson dynamique sont semblables, puisque le coefficient de Poisson mesuré augmente en fonction de l'indice de confinement. Ces deux mesures semblent indiquer que le confinement a eu un effet bénéfique sur la fissuration des colonnes. Les résultats de E dynamique ne sont pas aussi concluants, en effet on obtient une diminution du module en fonction de l'indice de confinement. On remarque dans tous les cas que le béton moyennement-réactif semble avoir une vitesse de propagation d'ondes moindre que le béton réactif.

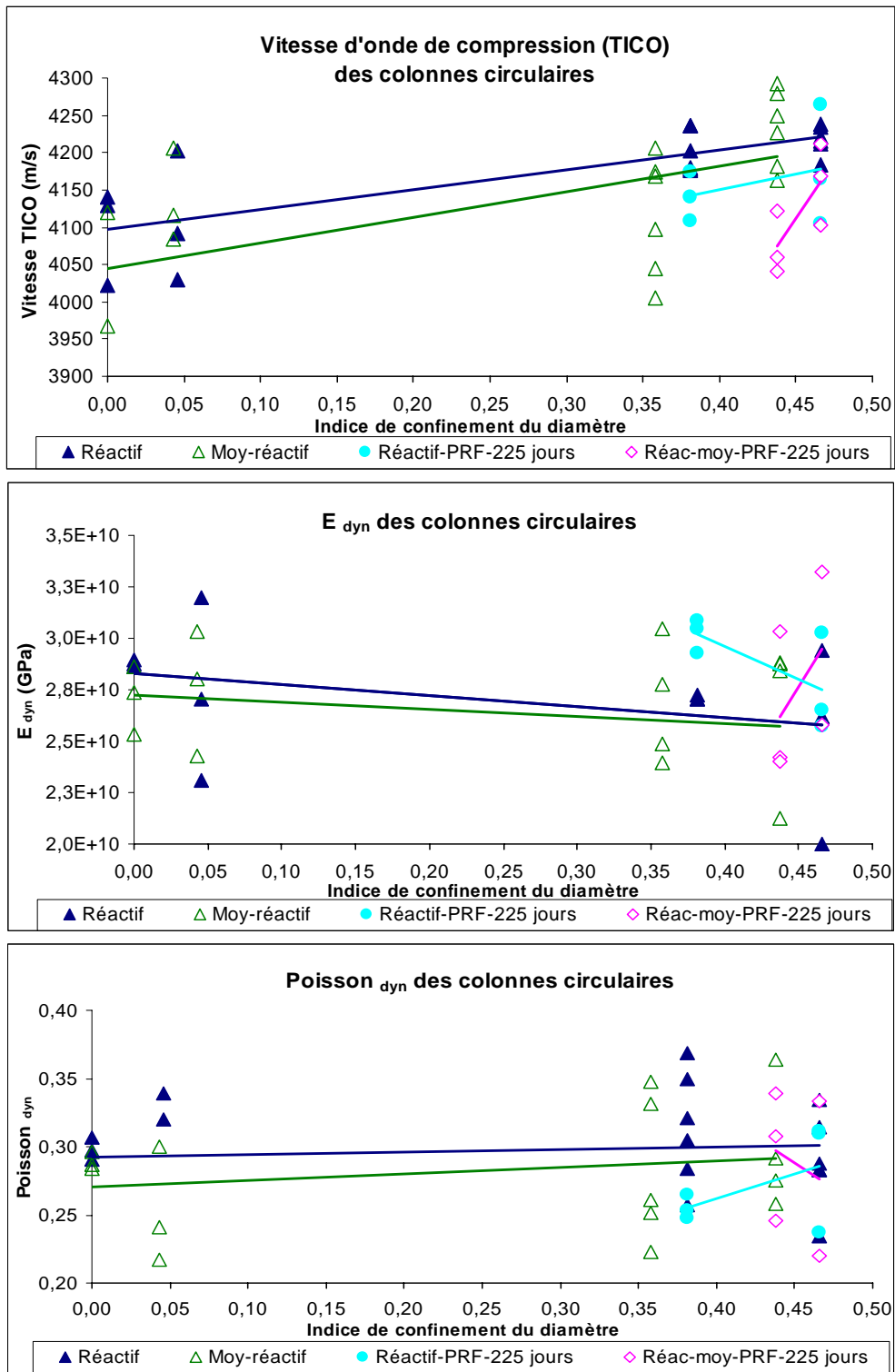


FIGURE 11 : RÉSULTATS SONIQUES EN FONCTION DE L'INDICE DE CONFINEMENT

On constate que le confinement semble avoir un effet sur l'expansion et la fissuration du béton en fonction de l'indice de confinement des colonnes. Cependant, l'analyse doit se poursuivre pour tirer des conclusions finales.

Conclusion

L'objectif du présent projet de recherche est d'évaluer les effets d'un confinement par matériaux composites sur des colonnes de béton affectées par les réactions alcalis-granulats. Les mélanges de béton et les conditions d'expositions ont été spécialement sélectionnés pour créer la RAG dans les échantillons. Les résultats initiaux indiquent que le confinement par PRF réduit significativement l'expansion et la fissuration. L'analyse se poursuit, les résultats seront présentés au Colloque.

Remerciements

Ce projet de recherche a été possible grâce au financement du Conseil de recherche en sciences naturelles et génie du Canada (CRSNG) à travers le Réseau de Centres d'excellence sur les Innovations en structures avec systèmes de détection intégrés (ISIS Canada). Le premier auteur voudrait aussi remercier le Fonds québécois de la recherche sur la nature et les technologies (FQRNT) pour la bourse thématique du Ministère des Transport du Québec. Les auteurs remercient Claude Aubé, Marc Demers, Paule Grandmaison, Christine Lacasse, Frédéric Pichette, Patrice Rivard, Éric St-Georges et François Saint-Pierre pour leurs diverses contributions au projet.

Bibliographie

Demers, M. and Neale, K.W. 1999. "Confinement of reinforced concrete columns with fibre-reinforced composite sheets – an experimental study", *Canadian Journal of Civil Engineering* **26** : 226-241

Fournier, B. and Bérubé, M.-A. 2000. "Alkali-aggregate reaction in concrete: a review of basic concepts and engineering implications", *Canadian Journal of Civil Engineering* **27** : 167-191.

Hamada, H. et al., "Influence of protective surface coating on the structural behaviour of ASR-affected RC beams under sustained loading", *Proceeding of 12th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete*, Beijing, 15-19 October 2004, pp. 1235-1244.

Lacasse, C., Labossière, P. and Neale, K.W. 2003. "On Fiber-Reinforced Polymer Rehabilitation of Alkali-aggregate reaction-Damaged Beams", *ACI Structural journal*, V. 100, No.1, January-February 2003, pp. 66-74.

Multon, S., Seignol, J.-F. and Toutlemonde F., "Structural behaviour of concrete beams affected by alkali-silica reaction", *ACI Materials journal*, V. 102, No.2, March-April 2005, pp. 67-76.

Pantazopoulou, S.J., Bonacci, J.F., Sheikh, S., Thomas, M.D.A. and Hearn, N. 2001. "Repair of Corrosion-Damaged Columns with FRP Wraps", *Journal of Composites for Construction*, Vol. 5, No. 1, February 2001, pp. 3-11.

Rochette, P. and Labossière, P. 2000. "Axial Testing of Rectangular Column Models Confined with Composites", *Journal of Composites for Construction*, Vol. 4, No. 3, pp. 129-136.

Smaoui N. et coll., « La réaction alcalis-silice dans les ouvrages d'art : influence des aciers d'armature et conséquences sur les propriétés mécaniques du béton », Compte-rendu du 12^e Colloque sur la progression de la recherche québécoise sur les ouvrages d'art, CD-ROM, Québec, mai 2005

Contact

Hugo Pelletier, ing. jr.
Département de génie civil
Faculté de génie
Université de Sherbrooke
2500 boul. Université
Sherbrooke (Québec) Canada
J1K 2R1

Hugo.Pelletier@USherbrooke.ca
Pierre.Labossiere@USherbrooke.ca