

Influence de l'état de contrainte et des conditions hygrométriques sur l'expansion d'un béton de masse affecté par la réaction alcalis-silice

Samy Essalik¹, Benoit Bissonnette¹, Benoit Fournier¹, Stéphane Multon², Matthieu Argouges³

¹ Université Laval, CRIB (Centre de recherche sur les infrastructures en béton), 1065 Av. de la Médecine, Québec, QC, Canada

² Université de Toulouse, UPS, INSA, LMDC (Laboratoire Matériaux et Durabilité des Constructions), 135, avenue de Rangueil, F-31 077 Toulouse Cedex 04, France

³ Hydro-Québec, Direction expertise barrages et infrastructures, stratégies et expertises, Montréal (Québec), Canada

ABSTRACT Plusieurs ouvrages en béton à travers le monde sont affectés par la réaction alcalis-silice (RAS), qui produit un gel gonflant et cause une détérioration progressive du matériau. Si cette pathologie complexe a fait l'objet d'un grand nombre d'études, d'importantes zones d'ombre subsistent quant au comportement volumétrique du béton réactif en fonction des sollicitations mécaniques externes et des conditions d'exposition hygrométriques. C'est le cas notamment pour les bétons de masse, qui se révèlent plus difficiles à caractériser en laboratoire. Cet article présente les résultats d'un programme réalisé sur un mélange de béton de masse de composition similaire à celui d'une centrale hydroélectrique affectée par la RAS au Canada. Les déformations d'éprouvettes soumises à différents états de contrainte (libre, 1-D, 2-D et 3-D) et exposées à différentes conditions hygrométriques (100% H.R., scellement) ont été suivies pendant une période d'une année. Les résultats montrent que les conditions hygrométriques peuvent exercer une influence potentiellement très forte sur la RAS et ses conséquences, l'initiation de la réaction avec le granulats considéré ayant nécessité un apport d'eau externe. Même en l'absence de sollicitations extérieures, l'expansion due à la RAS dans le béton de masse réactif à l'étude affiche un caractère anisotrope. Bien qu'on rapporte dans différentes études que l'expansion dans la direction du chargement peut être annihilée sous une contrainte soutenue aussi faible que 5 MPa, dans les présents travaux, un chargement de 10 MPa a entraîné une diminution de l'expansion de l'ordre de seulement 50%. Enfin, le phénomène de transfert de l'expansion a été observé, mais son intensité semble dépendre de l'orientation des sollicitations.

Keywords anisotropie des déformations; béton de masse; conditions d'exposition hygrométriques; état de contrainte; expansion; RAS; réaction alcalis-silice

I. INTRODUCTION

De nombreux ouvrages en béton de natures variées (centrales hydroélectriques, centrales nucléaires installations portuaires, ponts, tunnels, etc.) sont affectés à travers le monde par la réaction alcalis-silice (RAS), une pathologie parfois surnommée le "cancer du béton". La réaction entre les phases siliceuses instables de certains granulats et les hydroxydes alcalins naturellement présents dans la pâte de ciment produit un gel gonflant qui induit éventuellement une expansion du béton et entraîne un endommagement progressif de sa structure interne. Trois conditions physico-chimiques sont essentielles à l'initiation et à la poursuite de la RAS : 1) la présence de silice réactive dans les granulats (fins/grossiers); 2) une quantité suffisante d'ions alcalins pour maintenir un pH élevé dans la solution interstitielle du béton; et 3) une humidité interne élevée. Le gonflement et l'endommagement dus à la RAS peuvent entraîner des problèmes opérationnels importants dans les structures affectées et résultent très souvent en une réduction de leur durée de vie.

En raison des conditions favorables au déclenchement et au maintien de la réaction, les installations hydrauliques (barrages et centrales hydroélectriques) sont parmi les structures les plus touchées par la RAS. Les gestionnaires font face à un défi important dans la gestion de ces ouvrages. L'évaluation des marges de sécurité résiduelles et l'orientation des stratégies d'entretien bénéficieraient, il va sans dire, d'une approche méthodologique éprouvée permettant de prédire de manière fiable le comportement des structures affectées par la RAS. Malgré les avancées réalisées ces dernières décennies dans notre compréhension de la RAS, plusieurs zones d'ombre subsistent, limitant notre capacité à prédire de manière fiable le comportement futur des structures affectées (Rajabipour et coll., 2015). De plus, notre compréhension du comportement des bétons de masse affectés par la RAS est limitée. En effet, la majorité des travaux ont été réalisés sur des mortiers ou bétons courants, dont la taille maximale des particules et le volume granulaire sont plus faibles que ceux des bétons de masse. Ces caractéristiques peuvent potentiellement jouer sur le comportement déformationnel des bétons de masse affectés par la RAS. Pour une évaluation fiable du comportement futur des ouvrages de masse affectés (barrages, centrales hydroélectriques, etc.), il est essentiel de mieux comprendre l'influence des conditions hygrométriques et de l'état de contrainte sur les déformations induites par la RAS.

Les travaux faisant l'objet du présent article s'intègrent dans un projet plus large dont les objectifs sont d'évaluer les conditions actuelle (*diagnose*) et future (*prognose*) d'une centrale hydroélectrique affectée par la RAS. Plus spécifiquement, on s'intéressera ici aux résultats d'un programme expérimental visant à caractériser en laboratoire le comportement volumétrique d'un béton de masse réactif en conditions de sollicitations mécaniques et d'exposition hygrométriques représentatives.

II. Programme expérimental

Le programme expérimental mis en œuvre (voir Fig. 1) consistait ainsi à enregistrer les déformations axiales et transversales d'éprouvettes cylindriques d'un béton de masse soumises à différents états de contrainte et différentes conditions d'exposition hygrométrique. Des séries d'éprouvettes ont ainsi été soumises aux 12 combinaisons possibles des trois paramètres expérimentaux suivants :

- contrainte axiale soutenue (2) : 0 MPa, 10 MPa;

- confinement latéral passif (3) : sans confinement, anneaux en acier de 6,35 mm d'épaisseur; anneaux en acier de 9,53 mm d'épaisseur.
- conditions hygrométriques (2) : 100% H.R., scellement.

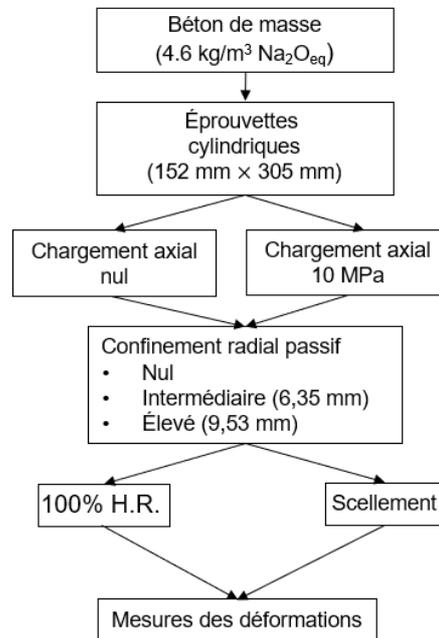


FIGURE 1 Programme expérimental

III. Matériaux et approche méthodologique

Matériaux

Le mélange de béton utilisé aux fins du programme expérimental est de composition similaire à celle de l'un des deux mélanges utilisés pour la construction de la centrale étudiée. Le gros granulat réactif utilisé pour préparer le mélange de reconstitution a été produit à partir de roche excavée aux abords site de la centrale hydroélectrique à l'étude, dans une zone soigneusement sélectionnée présentant des caractéristiques minéralogiques similaires à celles de la pierre d'origine. Le sable utilisé est non réactif et provient d'un dépôt glaciaire riche en quartz et en feldspaths. La composition du mélange et les caractéristiques des granulats sont présentées dans les Tab. 1 et 2.

Préparation des corps d'épreuve

En raison de la taille maximale des particules du gros granulat et de sa fraction volumique relativement élevée, les éprouvettes nécessaires pour les essais du programme (éprouvettes cylindriques 152×305 mm) n'auraient pu être fabriquées dans des moules sans risque d'en affecter la consolidation naturelle et, par conséquent, la représentativité. Pour cette raison, deux blocs de 0,7×1,2×0,5 m ont été fabriqués, dans chacun desquels 18 éprouvettes cylindriques ont été extraites par carottage. Les blocs ont été soumis à une cure humide à 23°C pendant 28 jours, pour ensuite être forés. Chaque carotte extraite a ensuite été sciée et meulée aux extrémités pour en ajuster la

longueur à 305 mm. Pour les carottes devant faire l'objet de confinement latéral (voir sous-section subséquente), leur paroi latérale a été meulée pour éliminer l'ondulation induite par l'opération de carottage et assurer un diamètre régulier de 152 mm.

TABLEAU 1 Mélange reconstitué et d'origine de la structure à l'étude

Caractéristiques et matériaux		Mélange d'origine	Mélange reconstitué
<i>Caractéristiques</i>			
E/C		0,63	0,60
Teneur en alcalis Na ₂ O _{eq}	(kg/m ³)	1,4	4,6
<i>Matériaux</i>			
Ciment type LH	(kg/m ³)	242	242
Eau	(kg/m ³)	151	145
Sable	(kg/m ³)	720	751
Pierre 5-20 mm	(kg/m ³)	768	537
Pierre 20-40 mm	(kg/m ³)	513	804
Agent entraîneur d'air	(mL/m ³)	41	-
Réducteur d'eau	(mL/m ³)	1 220	-
Superplastifiant	(mL/m ³)	-	4 254

TABLEAU 2 Caractéristiques des granulats

Catégorie	Calibre (mm)	Forme des granulats et proportion (%)			Type de roche	Sensibilité à la RAS
		Plat	Allongé	Plat et allongé		
Granulat fin	0-5	-	-	-	Quartz et feldspaths	Non réactif
Gros granulat	5-20 20-40	22.1 14.0	25.2 32.6	15.8 7.8	Métagrauwacke et métapélite	Réactif

Sollicitations mécaniques

Les éprouvettes ont été soumises à différents états de contrainte résultant d'une combinaison d'un chargement axial soutenu et d'un état de confinement radial.

Deux niveaux de chargement axial ont été considérés, correspondant à des contraintes de 0 et 10 MPa respectivement. Comme dans l'étude de Multon et Toutlemonde (2006), le chargement axial soutenu a été réalisé au moyen de bâtis de fluage en compression.

En ce qui a trait à la sollicitation transversale, les éprouvettes témoins ont été soumises à trois niveaux de confinement radial: 1) libre (confinement nul); 2) confinement passif au moyen de collets métalliques de 6,35 mm d'épaisseur (confinement intermédiaire); 3) confinement passif au moyen de collets métalliques de 9,53 mm d'épaisseur (confinement élevé). Les collets consistent en des anneaux métalliques ajustables au moyen de boulons de serrage et de cales permettant d'assurer le contact avec la paroi des éprouvettes au démarrage des essais. Lors de leur installation sur les corps d'épreuve, les collets sont espacés (espacement équivalent à la hauteur du collet) afin de permettre

un échange hydrique entre le béton et l'extérieur. Considérant les épaisseurs des anneaux utilisés et leur espacement, les niveaux de confinement sont du même ordre que ceux utilisés dans l'étude de Multon et Toutlemonde (2006), où on a plutôt recouru à des chemisages continus (condition hygrométrique considérée dans cette étude: scellement).

Conditions hygrométriques

Afin d'évaluer l'influence des conditions hygrométriques sur le développement de la RAS dans un béton de masse (cinétique et ampleur), des essais ont été réalisés respectivement sur des séries d'éprouvettes exposées à 100% H.R. et des séries d'éprouvettes scellées. Les éprouvettes conditionnées à 100% H.R. ont été installées dans des enceintes individuelles similaires à celles utilisées dans les essais d'expansion normalisés sur prisme de béton (CSA A23.1-14). Pour assurer le maintien d'un niveau d'humidité relative s'approchant de la saturation partout dans l'enceinte, la paroi de cette dernière est tapissée d'un géotextile préalablement humidifié et baignant dans un réservoir d'eau situé à la base. Un dégagement suffisant assure l'absence de contact entre le géotextile et l'éprouvette. Quant aux éprouvettes scellées, elles ont été recouvertes de trois couches de papier d'aluminium autocollant. Il importe de mentionner que les éprouvettes ont été maintenues en conditions saturées jusqu'au moment du scellement. La Fig. 2 présente les dispositifs expérimentaux utilisés pour la mise en œuvre des deux conditions hygrométriques considérées.

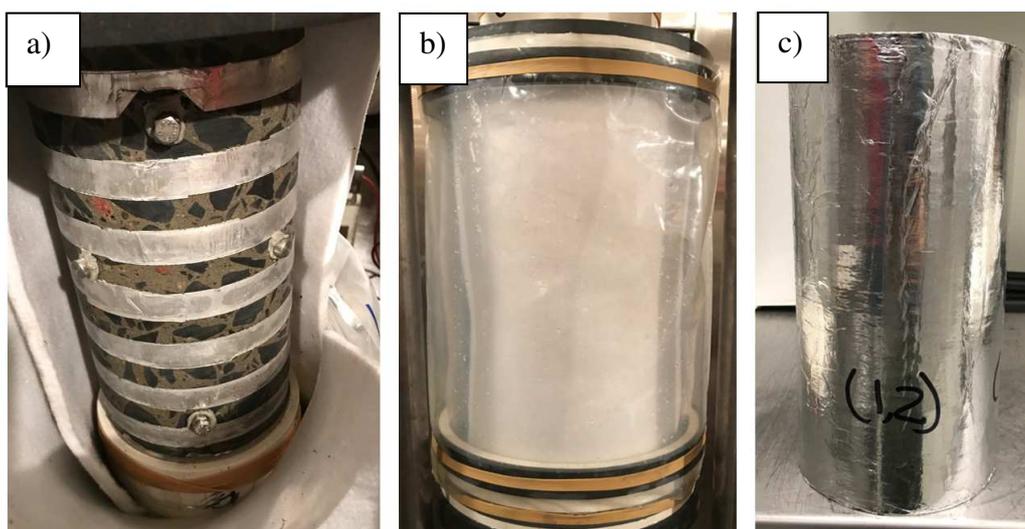


FIGURE 2 Conditions hygrométriques des éprouvettes: a) éprouvette exposée à 100% H.R. avec l'enceinte ouverte; b) éprouvette à 100% H.R. avec l'enceinte fermée; c) éprouvette scellée.

Mesure des déformations

Les déformations axiales et radiales sont mesurées au moyen de plots installés sur la paroi latérale des éprouvettes (Fig. 3). Chaque éprouvette est instrumentée de trois paires de plots (plots disposés axialement) décalées de 120° pour mesurer les déformations axiales à l'aide d'un extensomètre mécanique (DEMEC). Pour les mesures radiales, chaque éprouvette est instrumentée de deux paires de plots (plots disposés diamétralement) décalées de 90° . Les mesures radiales sont quant à elles effectuées au moyen d'un extensomètre en forme de « C » dont les embouts sont usinés.

IV. Résultats des essais

Éprouvettes non chargées axialement

La Fig. 4 présente l'ensemble des résultats pour les éprouvettes non chargées axialement (témoins) pour différents niveaux de confinement latéral, dans les deux conditions hygrométriques considérées.

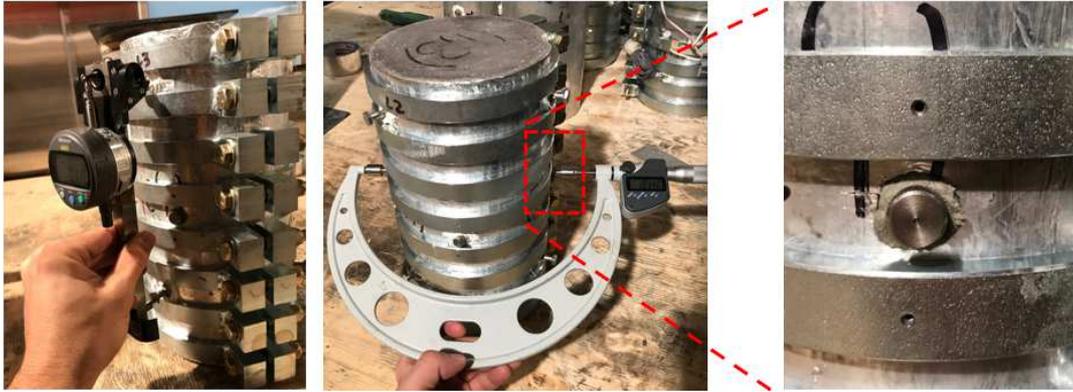


FIGURE 3 Disposition des plots et extensomètres utilisés pour la mesure des déformations axiales et radiales

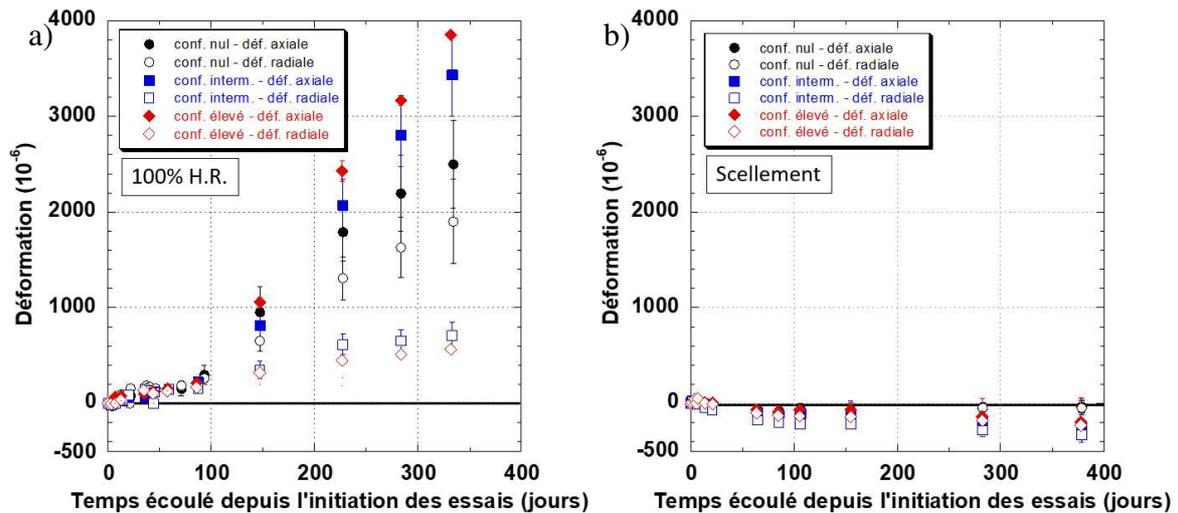


FIGURE 4 Évolution des déformations dans les éprouvettes non chargées axialement en fonction du niveau de confinement latéral (nul, intermédiaire, élevé): a) à 100% H.R.; b) en conditions scellées.

Dans les conditions à 100% H.R., les déformations enregistrées sont dans tous les cas positives (expansion) et les amplitudes sont relativement élevées, traduisant un état avancé de la RAS. Dans le cas des éprouvettes confinées, on remarque que les déformations axiales et radiales sont respectivement accrues et réduites comparativement à celles enregistrées sur les éprouvettes non confinées.

En comparant les amplitudes des déformations sur éprouvettes scellées à celles enregistrées à 100% H.R., on constate que la RAS nécessite un apport d'eau externe pour produire des effets

mesurables, du moins dans la fenêtre de temps considérée et pour le béton à l'étude. En effet, les déformations nettes enregistrées pour les éprouvettes scellées sont toujours négatives après presque 400 jours d'essai, révélant une très faible incidence de la réaction à ce stade et un comportement volumétrique dominé par les retraits hygrométriques.

Contrairement à ce qui est observé ici, Larive (1997) et Multon et Toutlemonde (2006) ont enregistré des niveaux d'expansion élevés sur des éprouvettes de bétons réactifs en conditions scellées. Cela pourrait s'expliquer par des différences quant à la réactivité et au calibre des granulats étudiés, la formulation des mélanges et la quantité d'eau initiale dans la porosité du béton. Par exemple, le diamètre maximal du gros granulat dans les présents travaux est le double de celui des granulats considérés dans les études de Larive et de Multon et Toutlemonde (5-40 mm *vs* 5-20 mm), impliquant une surface spécifique des particules moindre et donc, une cinétique de la réaction plus lente. En fonction de la teneur en eau résiduelle, un développement de la RAS et une expansion est attendu à plus long terme.

Éprouvettes chargées axialement

La Fig. 5 présente cette fois l'ensemble des résultats des mesures effectuées sur les éprouvettes chargées axialement pour différents niveaux de confinement latéral, dans les deux conditions hygrométriques considérées. Dans les deux conditions hygrométriques étudiées, tel qu'attendu dans des essais de fluage en compression après la mise sous charge, les déformations axiales instantanées et différées sont initialement négatives, alors que les déformations transversales sont positives en vertu de l'effet de Poisson. Dans le cas des éprouvettes scellées, les déformations continuent de croître de manière monotone dans le temps dans les directions axiale et transversale, reflétant le comportement caractéristique du béton en fluage sous chargement uniaxial de compression. En revanche, les courbes de déformation des éprouvettes exposées à 100% H.R. commencent à évoluer distinctement environ un mois après le début du chargement, différence qu'on attribue à la manifestation progressive de la RAS. Avec le développement de cette dernière et l'accroissement de l'expansion qui en découle, on constate des écarts croissants entre les déformations des éprouvettes non confinées latéralement et celles des éprouvettes confinées.

V. Discussion

Anisotropie des déformations de gonflement dues à la RAS

Sur la Fig. 4 a), on remarque dans le cas des éprouvettes libres non confinées exposées à 100% H.R. que les déformations axiales, qui coïncident avec la direction verticale (ou direction gravitaire) au moment de mise en place du béton, sont significativement plus élevées que les déformations dans la direction transversale. Ce comportement anisotrope a également été observé par Larive et coll. (2000) et Smaoui et coll. (2004). Dans des travaux récents impliquant le même mélange et la même méthode de fabrication des éprouvettes (carottes extraites de blocs forés) que ceux de la présente étude (Darveau, 2021), des vides et zones poreuses ont été détectés sous plusieurs particules du gros granulat (Fig. 6), vraisemblablement en raison de l'accumulation d'eau de ressuage lors de la mise en place du béton. Ces défauts localisés sous les particules du gros granulat réactif constituent des zones de faiblesse affectant vraisemblablement la résistance et la rigidité du béton,

vraisemblablement de façon plus marquée suivant la direction verticale. Dans le cas présent, la situation est possiblement exacerbée par l'orientation préférentielle présumée des particules de granulats plates et allongées dans la direction horizontale. Une fois la RAS initiée, les pressions délétères générées par le gonflement du gel pourrait ainsi favoriser une propagation de la fissuration orientée préférentiellement suivant la direction horizontale et, par conséquent, une expansion plus grande dans la direction axiale (sens de la coulée) comparativement à la direction radiale.

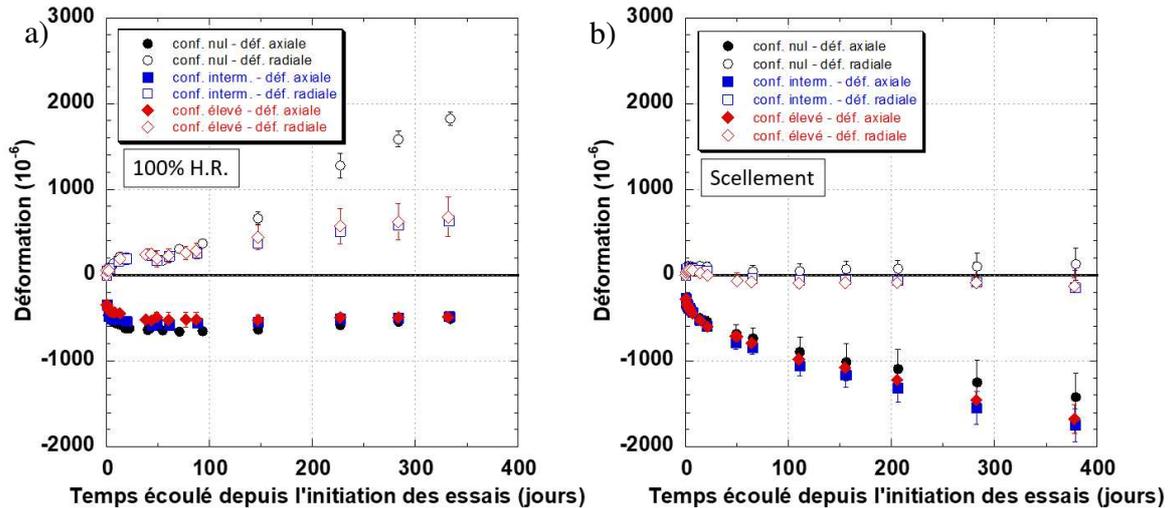


FIGURE 5 Évolution des déformations dans les éprouvettes chargées axialement en fonction du niveau de confinement latéral (nul, intermédiaire, élevé): a) à 100% H.R.; b) en conditions scellées.

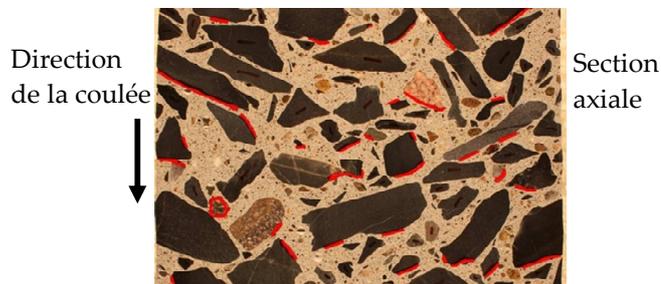


FIGURE 6 Photographie d'une plaque polie du mélange de béton de masse de la présente étude illustrant la localisation (traits en rouge) de vides et de zones très poreuses aux interfaces pâte-granulat (tiré de Darveau, 2021).

Expansion due à la RAS sous contrainte

La Fig. 7 présente l'évolution comparative des déformations axiales dans les éprouvettes soumises à un chargement soutenu de 10 MPa en fonction des conditions d'exposition hygrométriques (100% H.R. vs scellement). Les différences importantes et croissantes constatées entre les deux séries après environ 30 jours d'essai résultent de l'écart d'intensité de la RAS dans les deux conditions hygrométriques étudiées. À 100% H.R., la RAS se manifeste de façon significative après quelques semaines, alors qu'en conditions de scellement, elle est demeurée en latence tout au long de la

période de suivi considérée (plus d'une année). Si la RAS a contribué de façon très importante au bilan des déformations mesurées sur les éprouvettes conditionnées à 100% H.R., elle est demeurée négligeable en conditions scellées pendant une année complète de suivi, signifiant que le fluage propre est prépondérant dans les déformations sous scellement. La déformation de RAS axiale peut ainsi être estimée en première approche en calculant la différence entre les déformations mesurées à 100% H.R. et sous scellement. Il s'agit seulement d'une estimation approchée, car les déformations de fluage mesurées avec ou sans échange d'humidité ne sont pas rigoureusement équivalentes (Bissonnette, 1996). À près de 400 jours d'essai, cette déformation atteint environ 1000×10^{-6} , soit environ la moitié de l'expansion axiale mesurée sur les éprouvettes libres (témoins) non confinées. À la lumière des résultats obtenus par Larive (1997), Multon et Toutlemonde (2006) et Dunant et Scrivener (2012), on aurait pourtant pu anticiper que l'expansion due à la RAS dans la direction du chargement soit annihilée sous une contrainte de 10 MPa. Différents facteurs pourraient être à l'origine du comportement observé dans la présente étude, dont la nature minéralogique du granulats réactif étudié, la taille, la morphologie et la granulométrie des particules, la teneur élevée en alcalis dans le mélange de béton, les zones de faiblesse induites sous les particules du gros granulats et l'orientation préférentielle des particules de gros granulats plates et allongées.

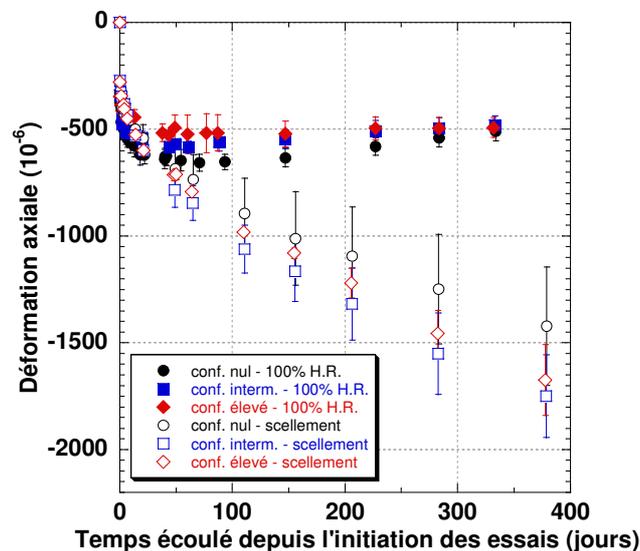


FIGURE 7 Évolution comparative des déformations axiales dans les éprouvettes soumises à un chargement soutenu de 10 MPa en fonction des conditions d'exposition hygrométriques (100% H.R. vs scellement) et du niveau de confinement latéral (nul, intermédiaire, élevé).

Transfert de l'expansion due à la RAS

Un phénomène d'intérêt lorsqu'on étudie les déformations de bétons réactifs sous contrainte est celui du *transfert de l'expansion* (Multon et Toutlemonde, 2006), en vertu duquel l'expansion mesurée est moindre dans la direction la plus sollicitée / confinée et plus importante dans la(les) direction(s) moins sollicitée(s). Pour les éprouvettes témoins non chargées axialement et exposées à 100 % H.R. (Fig. 4 a), les déformations axiales augmentent effectivement avec l'augmentation du niveau de confinement latéral, et donc, de la pression radiale générée. Dans le cas des éprouvettes chargées axialement, en particulier celles non confinées latéralement, on pourrait s'attendre à un transfert de

l'expansion dans la direction radiale, sur la base des résultats obtenus par Multon et Toutlemonde (2006), où un transfert de l'expansion avait été observé tant pour des sollicitations axiales que radiales. La Fig. 8 présente l'évolution comparative des déformations radiales dans les éprouvettes non chargées (témoins) et chargées axialement, exposées à 100% H.R. Or, on observe très peu de différences entre les déformations radiales des deux séries, pour chaque niveau de confinement considéré, signifiant que la charge axiale n'a pas causé un transfert de l'expansion dans la direction radiale.

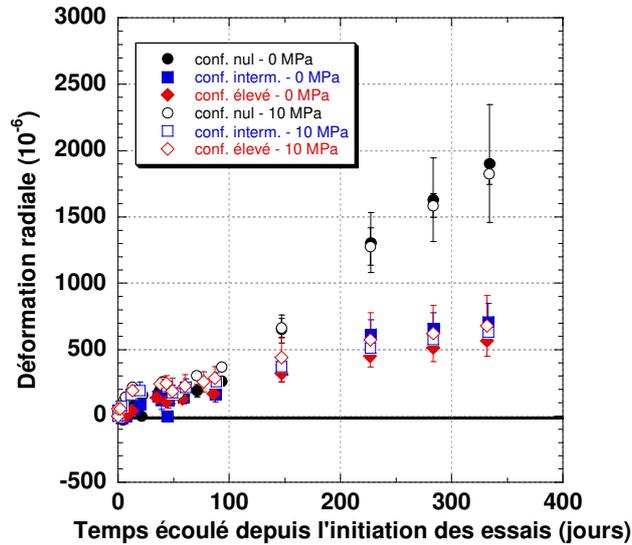


FIGURE 8 Évolution comparative des déformations radiales dans les éprouvettes non chargées et chargées (10 MPa) exposées à 100% H.R. en fonction du niveau de confinement latéral (nul, intermédiaire, élevé).

VI. Conclusion

Cet article a présenté les résultats d'un programme expérimental visant à caractériser le comportement déformationnel d'un béton de masse affecté par la RAS sous différents états de contrainte et conditions hygrométriques. Les conclusions suivantes peuvent être tirées :

- Suivant la nature et les caractéristiques du granulat réactif considéré, ainsi que la composition du mélange de béton, les conditions d'exposition hygrométriques nécessaires pour initier et alimenter la RAS en laboratoire peuvent varier. Pour le granulat réactif de cette étude, un apport en eau externe s'est révélé nécessaire, contrairement à ce qu'on a observé dans d'autres études, avec des granulats réactifs différents.
- Comme on l'a observé dans d'autres études, l'expansion due à la RAS dans le béton de masse réactif étudié est anisotrope. Les déformations enregistrées sont plus importantes suivant l'axe coïncidant avec la direction verticale de mise en place (direction gravitaire), phénomène qui pourrait être favorisé par l'emprisonnement de vides sous les particules du gros granulat pendant le ressuage du béton.

- L'état de contrainte dans le béton a une forte influence sur le comportement déformationnel, en particulier dans la direction la plus sollicitée. Bien qu'on ait observé dans différentes études que l'expansion dans la direction était fortement réduite, voire annulée, dans la direction du chargement sous une contrainte soutenue de l'ordre de 5 MPa et plus, une contrainte axiale de 10 MPa n'a permis de réduire l'expansion induite par la RAS que d'environ 50% dans le béton de masse étudié. Cette conclusion est déduite en effectuant la différence entre les déformations axiales mesurées sur les éprouvettes chargées, pour les deux conditions hygrométriques, et en la comparant à la déformation axiale en condition libre à 100% H.R. Plusieurs paramètres d'influence pourraient être en cause, dont la nature minéralogique du granulats, la taille et la forme des particules, la forte concentration en alcalis dans le béton, de même que le phénomène évoqué de ressuage bloqué sous les particules et d'orientation préférentielle des particules de granulats plates et allongées.
- Le phénomène de transfert de l'expansion dans les directions moins sollicitées a été observé dans la présente étude, mais en lien avec l'observation qui précède, son intensité semble dépendre de l'orientation et/ou de la nature des sollicitations. Si un confinement radial passif a effectivement causé un fort transfert dans la direction axiale, l'action d'une contrainte axiale dans la direction verticale (direction gravitaire au moment de la mise en place du béton) n'a pas causé de transfert dans la direction radiale.

Dans un béton sujet à la RAS, on constate qu'il est difficile d'apprécier l'influence des sollicitations sur le comportement volumétrique d'ensemble et l'anisotropie de l'expansion, en particulier pour un état de contrainte multiaxial. Pour mieux comprendre les interactions complexes en jeu, identifier des lois de comportement et être en mesure de prédire le comportement des ouvrages de masse affectés par la RAS, un travail d'analyse approfondi sur modèle est en cours.

VII. Remerciements

Les auteurs tiennent à remercier le Conseil de Recherche en Sciences Naturelles et en Génie du Canada (CRSNG) et Hydro-Québec pour leur soutien financier. Des remerciements sont également adressés à MM. Mathieu Thomassin, Éric Boucher et René Malo pour leur apport technique essentiel.

RÉFÉRENCES

Bissonnette, B. (1996). Le fluage en traction: un aspect important de la problématique des réparations minces en béton. Thèse de doctorat, Université Laval, 290 p.

CSA A23.1-14. (2015). Béton : Constituants et exécution des travaux. Méthodes d'essai et pratiques normalisées pour le béton. Canadian standards association, Mississauga, Ontario, 286 p.

Darveau, J.-B. (2021). Contribution à l'étude du comportement d'un béton de masse affecté par la réaction alcalis-silice : évolution et anisotropie de l'expansion, de l'endommagement et des propriétés mécaniques. Mémoire de maîtrise, Université Laval, 160 p.

Dunant, C. F., & Scrivener, K. (2012). Effects of uniaxial stress on alkali–silica reaction induced expansion of concrete. *Cement and Concrete Research*, 42, pp. 567-576.

Larive, C. (1997). Apports combinés de l'expérimentation et de la modélisation à la compréhension de l'alcali-réaction et de ses effets mécaniques. Thèse de doctorat, Laboratoire central des ponts et chaussées, 327 p.

Larive, C., Joly, M., & Coussy, O. (2000). Heterogeneity and anisotropy in ASR-affected concrete—Consequences for structural assessment. *Proc. 11th Int. Conf. AAR*, Québec City, Canada, pp. 919–928.

Multon, S. & Toutlemonde, F. (2006). Effect of applied stress on alkali-silica reaction-induced expansions. *Cement and Concrete Research*, 36, pp. 912-920.

Rajabipour, F., Giannini, E., Dunant, C., Ideker, J.H. & Thomas, M.D.A. (2015). Alkali–silica reaction: Current understanding of the reaction mechanisms and the knowledge gaps. *Cement and Concrete Research*, 76, pp. 130–146.

Smaoui, N., Bérubé, M-A, Fournier, B. & Bissonnette, B. (2004). Influence of Specimen Geometry, Orientation of Casting Plane, and Mode of Concrete Consolidation on Expansion Due to ASR. *Cement, Concrete and Aggregates*, 26(2), 13 p.