

Réduction du potentiel de fissuration des bétons de réparation: approche quantitative de la notion de compatibilité

F. Modjabi-Sangnier, A. Ghezal, B. Bissonnette et M. Jolin

Centre de recherche sur les infrastructures en béton
Département de génie civil, Université Laval
Sainte-Foy (Québec), Canada, G1K 7P4

Résumé

La fissuration des réparations effectuées sur les ouvrages en béton de ciment est malheureusement trop souvent présente et difficile à prédire. Les problèmes sont en bonne partie attribuables au fait que le retrait du matériau de réparation, phénomène inévitable, est empêché par le substrat. L'objectif de recherche est de développer des matériaux de réparation qui auront une tendance à la fissuration significativement réduite, en adoptant l'approche de la compatibilité volumétrique. Le programme expérimental comporte l'étude d'une gamme de matériaux s'étendant des bétons ordinaires aux BAP, les variables étudiées se voulant principalement les paramètres de composition (ajouts minéraux, chimiques et organiques; granulométrie) et l'effet de la température. La première phase a consisté en une caractérisation préliminaire des propriétés dont dépend la compatibilité volumétrique (module d'élasticité, retrait, fluage), ceci en vue d'effectuer un tri et de resserrer l'étude sur les matériaux/paramètres les plus porteurs (leviers permettant d'optimiser la *déformabilité* des matériaux). Dans la seconde phase, actuellement en cours, l'étude de la compatibilité est approfondie pour certains matériaux/paramètres sélectionnés en vue d'établir, au moyen d'essais dits de *comportement*, la corrélation entre les propriétés des matériaux et l'occurrence de la fissuration en situation de retrait empêché.

Introduction

La fissuration à plus ou moins court terme des réparations effectuées sur les ouvrages en béton de ciment est malheureusement trop souvent présente et difficile à prédire. Les problèmes sont en bonne partie attribuables au fait que le retrait du matériau de réparation, phénomène inévitable, est empêché par le substrat. L'objectif de recherche est alors de développer des matériaux de réparation qui auront une tendance à la fissuration significativement réduite, en adoptant l'approche de la compatibilité volumétrique. À ce titre, des résultats obtenus récemment en laboratoire indiquent que les bétons autoplaçants (BAP) sont caractérisés par un fort potentiel de fluage, ce qui influencerait favorablement leur résistance à la fissuration.¹ Incidemment, des observations sur le terrain au cours des dernières années témoignent d'un très bon comportement de ces bétons à la fissuration.²

Le programme expérimental comporte donc l'étude d'une gamme de matériaux s'étendant des bétons ordinaires aux BAP. Les variables étudiées concernant principalement les paramètres de composition (ajouts minéraux, chimiques et organiques; granulométrie) et l'effet de la température. La première étape des travaux a consisté en une caractérisation préliminaire des propriétés dont dépend la compatibilité volumétrique (module d'élasticité, retrait, fluage), afin d'effectuer un tri et de resserrer l'étude sur les matériaux/paramètres les plus porteurs (leviers permettant d'optimiser la *déformabilité* des matériaux). Un bilan des observations et conclusions de cette première phase sera dressé plus loin.

Objectif de l'étude

Au cours des dernières années, alors qu'on a vu l'utilisation des BAP dans des travaux de réparation croître de façon significative, il a été constaté dans bien des cas que ces matériaux se révèlent peu sensibles à la fissuration.^{2,3} Le phénomène pourrait être attribuable à un fort potentiel de fluage, tel qu'observé dans des travaux de laboratoire récents.¹ *A priori*, ces matériaux démontrent un potentiel prometteur pour mettre en oeuvre des réparations durables, à condition de comprendre leur comportement dans des conditions de chargement et d'exposition données et de mettre en évidence les paramètres permettant de satisfaire la compatibilité volumétrique.

En résumé, l'étude consiste à comprendre pourquoi les BAP présentent une bonne compatibilité déformationnelle et, plus spécifiquement, ce qui causerait leur tendance apparemment réduite à la fissuration. Implicitement, l'étude doit aussi permettre de valider les constatations relevées sur les BAP relatives à leur fort potentiel de déformation. Ces travaux de recherche doivent ainsi mener à des éléments de compréhension quant à l'influence des principaux paramètres de composition, vraisemblablement la fraction volumique des granulats et la combinaison agent de viscosité / superplastifiant, sur le potentiel de fluage des BAP. Par ailleurs, de façon plus générale, des données de base sur le bilan fluage-retrait seront générées en vue de formuler des matériaux satisfaisant à la problématique de compatibilité volumétrique. Enfin, les résultats obtenus en laboratoire doivent être validés en chantier.

Problématique

Des progrès importants ont été accomplis ces dernières années en ingénierie de la réparation des ouvrages. Quoi qu'il en soit, on se trouve encore aux prises avec trop de cas de réparations présentant des problèmes de durabilité nécessitant à court terme de nouvelles interventions. Pour remédier de façon durable au problème à l'origine la détérioration de l'ouvrage, il est non seulement essentiel que le matériau de réparation soit intrinsèquement durable, mais il doit également être peu sensible à la fissuration.

La fissuration du matériau de réparation est attribuable au fait que le nouveau matériau cherche à se contracter, résultat des retraits endogène et de séchage, alors que la structure servant de support se trouve dans un état volumétrique plus stable. La nouvelle couche de béton se trouvant empêchée de faire sa contraction par l'ancien béton, elle va développer des contraintes internes de traction. Si les contraintes induites excèdent la résistance à la traction du matériau de réparation, des fissures vont alors apparaître. Il s'agit là d'un problème particulier de retrait restreint, où le béton de réparation fissure en réponse à des contraintes de tension induites par le retrait. Étant donné que cette fissuration est difficile à prédire, et ce même quand toutes les règles de bonne pratique ont été respectées, il est important de comprendre les paramètres qui en sont responsables et les moyens de la limiter.

Plusieurs publications ont été consacrées jusqu'ici au thème des réparations et ont principalement traité du caractère composite de la réparation. Une philosophie toujours répandue est que le matériau de réparation doit être similaire au matériau d'origine, suivant le principe fondamental de «*Repair like with like*».⁴ Selon un certain nombre de spécialistes, en suivant cette approche consistant à réparer avec un matériau similaire au matériau d'origine (composition, propriétés), la pérennité de la réfection est assurée. Même si au premier abord l'approche «*like with like*» paraît tout à fait logique, elle ne prend pas en compte certaines

différences inévitables, notamment le retrait de séchage du matériau de réparation au jeune âge. Ainsi, il convient d'envisager le problème de façon plus globale en analysant les paramètres qui régissent la *compatibilité* entre le matériau de réparation et le béton d'origine (compatibilités mécanique, chimique, électrochimique et de perméabilités).⁵

En particulier, pour caractériser la compatibilité déformationnelle (ou mécanique) entre le nouveau béton et le béton d'origine dans des conditions de retrait gêné, cinq principaux paramètres sont à considérer:^{4,6-9} le retrait, le module élastique, le fluage, le degré de restriction et la résistance à la traction. Ainsi, avec les seules données de retrait libre obtenues dans un essai normalisé en laboratoire, il n'est pas possible de prédire de façon fiable le comportement du matériau en conditions réelles de retrait empêché.

Selon une étude antérieure au CRIB de l'Université Laval,¹⁰ le potentiel de fissuration du matériau n'est pas nécessairement proportionnel à l'amplitude du retrait de séchage, puisqu'une partie des contraintes induites peut être soulagée par le fluage en traction. Ainsi, plus un matériau possède un potentiel de fluage en traction important, plus les contraintes induites vont être soulagées et la fissuration se verra réduite, sinon prévenue. Les résultats rapportés dans cette étude démontrent que le fluage du béton en traction constitue une propriété importante qui ne peut être négligée dans le contexte particulier des réparations; en conditions de séchage, l'amplitude des déformations de fluage en traction enregistrées est significative en regard des déformations correspondantes de retrait. Il a de plus été constaté que le potentiel de fluage en traction peut varier de façon importante en fonction de certains paramètres de composition, parfois bien davantage que le retrait. Il apparaît donc possible d'élaborer des matériaux de réparation présentant un potentiel de fluage élevé tout en respectant les exigences minimales de durabilité.

Méthodologie et bilan des travaux effectués à ce jour

Cette étude est réalisée dans le cadre d'un projet RDC (Recherche et Développement Coopératif) du CRSNG et comprend quatre larges volets expérimentaux. La première phase, déjà achevée, portait sur l'évaluation des paramètres de compatibilité mécanique d'une large gamme de bétons. Les résultats obtenus à l'issue de cette phase de *dégrossissage* ont servi à définir le programme de la deuxième phase. Cette dernière a démarré il y a quelques mois et les essais sont encore en cours d'exécution. Dans cette phase des travaux, le but est d'établir une corrélation entre les propriétés hygrométriques (retrait) et mécaniques (module élastique, fluage) et le potentiel de fissuration du béton. La troisième phase sera consacrée à une étude de l'effet de température sur la compatibilité volumétrique des réparations. Quant à la quatrième partie, elle consistera en des essais de chantier sur des planches expérimentales de taille réelle.

Le but de la première phase de l'étude était d'identifier de façon approchée les leviers matériaux devant permettre une optimisation de la formulation des bétons sur la base des principes de compatibilité. En premier lieu, il était important de connaître les paramètres matériaux (type de liant, présence et type d'agent de viscosité, type de fluidifiant) les plus influents sur le comportement volumétrique (retrait et fluage) des bétons ordinaires et des bétons autoplaçants, ceci à des fins d'utilisation dans les réparations. Il s'agissait en effet d'une campagne de caractérisation globale d'un large éventail de bétons allant du béton ordinaire jusqu'au béton autoplaçant, en passant par les bétons fluides. Les résultats de cette phase devaient servir à sélectionner, parmi les différentes gammes de bétons considérées, les

mélanges qui montrent un meilleur comportement volumétrique vis-à-vis la compatibilité, afin de concevoir la grille des matériaux de la phase subséquente. Les matériaux requis pour lancer la première phase ont été choisis de façon à produire 21 mélanges répartis sur quatre séries de bétons : les bétons autoplaçants sans agent de viscosité, les bétons autoplaçants avec agent de viscosité, les bétons fluides et les bétons ordinaires (voir le Tableau 1). Le programme d'essais consistait à caractériser les propriétés à l'état frais et à l'état durci des 22 bétons. Le tableau 2 résume le programme expérimental de la première phase du projet.

Tableau 1 – Compositions des bétons dans la phase I du programme expérimental.

(BO – réf.)	Béton fluide (BF)	BO avec (AV)	BAP sans AV	BAP avec AV
Liant				
• T10	<ul style="list-style-type: none"> • T10 • T10 + FS • T20 • T_C • T_L 	• T10 + FS	<ul style="list-style-type: none"> • T10 • T10 + FS • T_C • T_L 	<ul style="list-style-type: none"> • T_C • T_L
Superplastifiant				
• X2	<ul style="list-style-type: none"> • X1 • X2 	<ul style="list-style-type: none"> • N2 • X1 • X2 	<ul style="list-style-type: none"> • N1 • X1 	<ul style="list-style-type: none"> • X1 • X2 • X3
Agent de viscosité				
–	–	<ul style="list-style-type: none"> • Cellulose • Wellan gum • Carbohydrate 	–	<ul style="list-style-type: none"> • Cellulose • Wellan gum • Carbohydrate
1 béton (E/C=0,38)	6 bétons (E/C=0,38)	3 bétons (E/C=0,38)	4 bétons (E/C=0,38)	8 bétons*
<p>T10 : ciment Portland ordinaire ; T10 + FS : ciment Portland ordinaire avec fumée de silice ; T20 : ciment Portland ordinaire modéré ; T_C : ciment ternaire contenant des cendres volantes ; T_L : ciment ternaire contenant du laitier de haut-fourneau ; X1, X2, X3 : superplastifiant à base de polycarboxylate ; N1 : superplastifiant à base de naphthalène ; N2 : superplastifiant à base de co-polymère de naphthalène.</p> <p>* 6 bétons de rapport E/C=0,38 et 2 bétons de rapport E/C=0,40</p>				

Les résultats de la première phase indiquent que les BAP fabriqués sans agent de viscosité ont des coefficients de fluage comparables à ceux de BAP de composition similaire, mais dans lesquels a été incorporé un agent de viscosité. Ce résultat est important, car il signifie que, contrairement à certaines hypothèses évoquées en début de projet, les agents de viscosité ne seraient pas à l'origine du potentiel de fluage souvent élevé des BAP. Par ailleurs, sur la base des résultats obtenus, le fluage des BAP semble être fortement influencé par le type de superplastifiant utilisé. Par exemple, les BAP contenant un superplastifiant à base de PNS affichent un fluage beaucoup plus élevé que ceux contenant un polycarboxylate. En outre, on observe des différences de comportement viscoélastique marquées entre trois BAP ayant une formulation identique, à l'exception de la nature du superplastifiant de type polycarboxylate. Le type de liant joue également un rôle très important sur le comportement viscoélastique des bétons. Les coefficients de fluage les plus élevés ont généralement été obtenus dans les mélanges faits avec les liants binaire et ternaire. Dans l'ensemble, les résultats obtenus ont permis de sélectionner certaines composantes-clés (nature du superplastifiant, types de liant) pour une étude approfondie des propriétés de compatibilité volumétrique dans la phase subséquente.

Tableau 2 – Essais réalisés sur les gammes de bétons de la phase I.

Béton frais	Béton durci
Teneur en air	Résistance à la compression
Évolution de l'étalement dans le temps	Module d'élasticité
Évolution des propriétés rhéologiques	Retrait de séchage
Masse volumique	Fluage flexionnel

La deuxième phase de l'étude porte sur une évaluation exhaustive des matériaux dont le potentiel a été jugé le plus intéressant au terme de la première phase (le tiers des formulations étudiées lors de la première phase). Cette portion du programme expérimental vise d'abord, avec un programme d'essais ciblé, à établir une corrélation précise entre les propriétés individuelles (résistance à la traction, module élastique, retrait, fluage) du matériau et son comportement en situation de mouvement restreint, pour ultimement jeter les bases à des méthodes de calcul permettant d'évaluer quantitativement la notion de compatibilité. Cette phase a par ailleurs pour but de comparer les résultats de fluage en traction et ceux de fluage en flexion en vue de valider (et modéliser) l'essai de fluage en flexion pour la caractérisation de la compatibilité mécanique des matériaux de réparation. Pour implanter la notion de compatibilité dans la pratique des réparations, il est essentiel de développer des outils de caractérisation simples et accessibles.

Pour les travaux de la phase II, huit formulations de béton spécifiques ont été sélectionnées (voir le Tableau 3). La grille des mélanges est ainsi constituée de trois bétons autoplaçants fabriqués avec un liant ternaire à base de laitier, trois bétons autoplaçants fabriqués avec un liant ternaire contenant des cendres volantes, un béton fluide et un béton ordinaire de référence. Outre la nature du liant, les adjuvants rhéologiques (superplastifiant, agent de viscosité) constituent l'autre variable principale du programme; deux superplastifiants, l'un à base de naphthalène et l'autre à base de polycarboxylate, ont été utilisés, de même qu'un agent de viscosité, de la gomme de Wellan. Tous les bétons de cette phase ont été formulés avec un rapport E/L = 0,40.

Tel que mentionné précédemment, l'une des particularités du second programme concerne l'exécution parallèle des essais de fluage en traction et en flexion. Le but de la réalisation concomitante de ces deux types d'essai est de vérifier si l'essai de fluage flexionnel pourrait constituer une alternative fiable à l'essai de fluage en traction. La possibilité de remplacer l'essai de fluage en traction par l'essai de fluage flexionnel comporterait de nombreux avantages. Le banc de l'essai de fluage en traction est en effet un dispositif très complexe et la réalisation des essais nécessite la mobilisation de ressources importantes. À l'opposé, l'essai de fluage flexionnel est simple à mettre en œuvre, beaucoup moins onéreux, réalisable dans n'importe quel laboratoire et ne demande pas beaucoup de préparatifs. Finalement, les deux types de mesures de fluage seront comparés et analysés en vue de mettre en évidence une éventuelle corrélation.

Tableau 3 – Formulation des bétons étudiés dans la phase II du programme expérimental.

Bétons ¹	Ciment	Adjuvants	Liant (kg)	Eau (kg)	AV (ml/kgC)	SP (ml/kgC)	Granulat (kg)	Sable (kg)	DEA (ml/kgC)	Étalement (mm)	Air (%)
BAPL1	TL	PNS ²			–	17,5	796	901,4	0,02	660	2,6
BAPL2	TL	PNS+W ³			2,1	14,5	795	903	0,02	710	2,0
BAPL3	TL ⁵	PC ⁴			0,5	8,2	796	901,4	0,04	670	2,5
BAPC1	TC	PNS	470	188	–	15	807	913,8	0,01	700	2,4
BAPC2	TC	PNS+W			3,8	12,5	805	911,5	0,01	670	1,7
BAPC3	TC ⁶	PC			0,6	7,0	807	913,8	0,04	655	2,4
BF	TL	PNS			–	9,3	812,3	921	0,02	230 (aff.)	2,7
BO (réf)	T10	PNS			–	5,9	783	886,6	0,02	120 (aff.)	3,1

¹ E/C = 0,40; ² superplastifiant à base de naphthalène; ³ gomme de wellan; ⁴ superplastifiant à base de polycarboxylate; ⁵ liant ternaire contenant du laitier; ⁶ liant ternaire contenant des cendres volantes

Le programme expérimental de la deuxième phase comporte des essais pour caractériser les bétons à l'état frais et à l'état durci. Comme on peut voir dans le tableau 4, ce volet intègre davantage d'essais sur béton durci.

Une autre spécificité de cette seconde partie concerne l'essai de retrait annulaire témoin ou (non restreint). Le protocole de l'essai ASTM C1581-04 a été élargi pour mesurer le retrait libre du matériau sur un anneau non restreint ayant des dimensions identiques à celles de l'échantillon annulaire restreint. La différence fondamentale réside dans le choix du matériau constitutif de l'anneau intérieur restrictif, fait dans ce cas d'un matériau de très faible rigidité (polystyrène expansé).

Tableau 4 – Essais réalisés sur les gammes de bétons de la phase II.

Béton frais	
Teneur en air	Masse volumique
Évolution de l'étalement dans le temps	Temps de prise
Évolution des propriétés rhéologiques	
Béton durci	
Retrait de séchage	Résistance à la compression
Essai d'anneau retreint	Fendage
Essai d'anneau témoin (non restreint)	Module d'élasticité
Essai de la dalle de <i>Baenziger</i>	Fluage en flexion
Porosimétrie	Fluage en traction
MEB	Retrait endogène
Tension de surface	

Le travail de la deuxième phase s'articule autour de la validation de l'approche de compatibilité mécanique reposant sur le bilan des déformations décrit par l'équation suivante:

$$\Sigma(\varepsilon) = [\varepsilon_{\text{retrait}} - (\varepsilon_{\text{élastique}} + \varepsilon_{\text{fluage}} + \varepsilon_{\text{microfissuration}})] \quad (1)$$

En première analyse, la validation misera sur un calcul paramétrique individuel de cette équation à partir des résultats expérimentaux obtenus (fluage, anneau restreint, anneau non restreint, etc.). Une fois établie, cette validation aura pour but d'établir des critères de performance et d'identifier les paramètres de composition et de conception qui exercent une influence réelle sur la sensibilité à la fissuration des matériaux de réparations. Ceci permettra d'optimiser la formulation des bétons et mortiers de réparation en fonction de leur compatibilité mécanique globale.

La troisième phase du projet comportera un programme d'essais visant essentiellement à préciser, comprendre et prédire l'effet de la température sur les propriétés individuelles de compatibilité et sur le comportement correspondant en situation de retrait restreint. L'influence de la température ambiante sur la microstructure du matériau au moment de la mise en place sera plus spécifiquement évaluée au cours des premières vingt-quatre heures suivant le contact eau-ciment. Pour certaines des formulations de cette phase, le programme d'essais complet de la phase II sera conduit suivant deux régimes de mûrissement (période 0-24 h après le contact eau-ciment) différents du point de vue thermique, soit à 10 °C et à 30 °C. Ceci permettra de couvrir le spectre usuel de température de mise en place rencontré en pratique.

La dernière phase du projet a pour but de valider les résultats obtenus en laboratoire en réalisant des essais *in situ* sur des planches expérimentales de taille réelle. Le programme expérimental de cette phase comprendra le resurfaçage de dalles et/ou de trottoirs avec des mélanges préalablement optimisés en fonction de leur compatibilité mécanique. De façon à inclure l'effet de la température, les réparations seront effectuées à différentes périodes de l'année.

Toute cette démarche doit conduire à la formulation de bétons de réparation durables. Malgré l'aspect fondamental des travaux à certains égards, cela demeure l'objectif de fond.

Références Bibliographiques

1. Boily, D., (2002) *Étude paramétrique du fluage en traction des bétons de réparation*, Mémoire de maîtrise, Département de Génie Civil, Université Laval, Québec, Canada, 200 p.
2. Pilon, B., (2004) *Réparation du tunnel Notre-Dame-de-Grâce au moyen de béton autoplaçant*, Compte rendus du 11^e Colloque sur la progression de la recherche québécoise sur les ouvrages d'art, Ministère des Transports du Québec, 11 et 12 mai, Québec, 11 p.
3. Fay, F., Bessette, M.-O. et Morin, R., (2004) *Réfection du passage inférieur Jarry/Querbes*, Compte rendus du 10^e Colloque sur la progression de la recherche québécoise sur les ouvrages d'art, Ministère des Transports du Québec, 11 et 12 mai, Québec, 9 p.
4. Emmons, P. H. et Vaysburd, A. M., (1995) *Performance criteria for concrete repair Materials - Phase I*, Technical Report REMR-CS-47, U.S. Army Corps of Engineers, 113 p.

5. Emmons, P. H. et Vaysburd, A. M., *Total system concept - necessary for improving the performance of repaired structures*; Concrete International, 1995, **17**(3), pp. 31-36.
6. Bissonnette, B., Pigeon, M., (2000) *Le comportement viscoélastique du béton en traction et la compatibilité déformationnelle des réparations*; Materials and Structures, **33**(226), pp. 108-118.
7. Morgan, D. R., (1996) *Compatibility of concrete repair materials and systems*; Construction and Building Materials, **10**(1), pp. 57-67.
8. Pigeon, M. et Bissonnette, B., (1999) *Tensile creep and cracking potential*, Concrete International, **21**(11), pp. 31-35.
9. Emmons, P. H. et Vaysburd, A. M., (1994) *Factors affecting the durability of concrete repair : the contractor's view point*; Construction and Building Materials, **8**(1), pp. 5-16.
10. Bissonnette, B., (1996) *Le fluage en traction: un aspect important de la problématique des réparations minces en béton*, Thèse de doctorat, Université Laval, 288 p.