

19^e Edition des Journées scientifiques
du Regroupement Francophone pour la Recherche et la Formation sur le Béton
(RF)²B

SIAME, Anglet, France
12 et 13 juillet 2018

ÉVALUATION QUANTITATIVE DE LA SENSIBILITE A LA FISSURATION DU BETON PROJETÉ AU MOYEN DE L'ESSAI DE RETRAIT RESTREINT ANNULAIRE

B. Menu^A, A. Pépin Beaudet^A, M. Jolin^A, B. Bissonnette^A, L. Molez^B

^A Centre de recherche sur les infrastructures en béton, Université Laval, Québec, Canada

^B Laboratoire de génie civil et génie mécanique, INSA de Rennes, Rennes, France

RÉSUMÉ : La mise en place du béton par projection pneumatique est très efficace, notamment pour la réhabilitation des infrastructures en béton et pour le support souterrain, en permettant des interventions rapides et relativement économiques. Toutefois, les bétons projetés peuvent être sujets à la fissuration au jeune âge, laquelle peut affecter significativement la durabilité des interventions dans le domaine du génie civil, sans compter les désagréments sur le plan architectural. Les problèmes accrus de fissuration précoce dans ces bétons sont dus en partie à leur composition particulière. L'objectif de la recherche dans laquelle s'inscrivent les travaux expérimentaux rapportés dans cet article est d'évaluer adéquatement et, à terme, minimiser le potentiel de fissuration due au retrait des bétons projetés. Les résultats générés démontrent que malgré les avantages technologiques qu'ils peuvent présenter, les ajouts minéraux et polymériques peuvent contribuer à réduire significativement la capacité de relaxation en traction des mélanges de béton projeté et, par conséquent, à en augmenter la sensibilité à la fissuration. À des fins d'optimisation, les connaissances en ce qui concerne les propriétés déformationnelles des bétons projetés sont encore à parfaire.

Mots clés: anneau, béton projeté, cendre volante, fissuration, fumée de silice, polymère, retrait restreint

1. INTRODUCTION

La projection pneumatique, généralement appelée béton projeté, constitue une méthode de mise en place d'un mortier ou d'un béton. La technique est à la fois très efficace, simple

et rapide de mise en œuvre, sans pour autant affecter la performance du matériau, dans la mesure où la vitesse de projection est suffisante pour en assurer la consolidation. Le béton projeté est largement utilisé pour le support souterrain, la stabilisation de pente, et la réhabilitation d'infrastructures en béton ([Bolduc et al., 2009](#)). Si la technique est très performante, on constate souvent en chantier une forte sensibilité des bétons projetés au retrait et à la fissuration au jeune âge. Le retrait et la fissuration prématurée est une question clé de la durabilité à long terme des bétons projetés. Les problèmes sont en bonne partie attribuable au fait que la composition des mélanges de béton projeté contienne elle-même des paramètres essentiels qui influence significativement le retrait et la fissuration. En fait, les mélanges de béton projeté contiennent généralement de hautes teneurs en liant, un plus faible volume granulaire et divers adjuvants (accélérateurs, superplastifiants, stabilisateurs, etc.). En conséquence, les mélanges de béton projeté sont généralement caractérisés par un retrait plus élevé que celui des bétons mis en place par gravité ([Ansell, 2010](#)).

Maîtriser la fissuration au jeune âge du béton projeté est primordiale pour la durabilité des ouvrages où le béton projeté est utilisé, particulièrement dans le cas des réparations superficielles. Les études réalisées sur le retrait ont souvent porté sur la réduction du retrait libre. Or, la réduction retrait libre ne donne pas forcément une indication sur le risque de fissuration prématurée ([Messan et al., 2009](#)). Ceci s'explique par le fait que le développement des contraintes dues au retrait empêché fait intervenir d'autres phénomènes et propriétés du matériau, dont le fluage. Malheureusement, on trouve peu d'information dans la littérature concernant les propriétés déformationnelles et le potentiel de fissuration du béton mis en place par projection. Le présent article présente des résultats d'une étude est voué spécifiquement à l'évaluation de la fissuration du béton projeté en conditions empêchées.

2. CAMPAGNE EXPÉRIMENTALE

2.1 Composition des mélanges

Cinq formulations ont été sélectionnées dans une campagne visant à évaluer la sensibilité à la fissuration du béton projeté en conditions de mouvement empêché. Les différents mélanges de bétons projetés ont été formulés de manière à étudier les paramètres clés de composition tels que la fumée de silice (FS), la cendre volante (CV) et un ajout polymère (POL) pouvant influencer la sensibilité à la fissuration du matériau. Les proportions des différents constituants entrant dans la composition des mélanges de béton projeté par voie sèche étudiés sont présentées dans le [Tableau 1](#). Le premier mélange (M1) constitue le béton de référence. On a ensuite substitué une quantité du ciment de ce dernier par de la fumée de silice ou une combinaison de cette dernière avec de la cendre volante ou un polymère. Les mélanges ont tous été formulés avec les mêmes granulats (calcaire concassé 5-10 mm; sable siliceux naturel 0-5 mm) et les mêmes proportions. Le ciment utilisé est de type GU (utilisation générale; équivalent CSA type 10). Le diamètre du plus gros granulats utilisé est de 10 mm et le sable a un module de finesse de l'ordre de 2,69. Les mélanges ont été mis en place par projection avec le procédé sec. Les mélanges ont été projetés dans la salle de projection du CRIB de

l'Université Laval. Le rapport eau/liant (E/L) effectif est indiqué dans le tableau, mais il importe de souligner qu'il n'a pas été décidé préalablement aux projections puisqu'elles ont été effectuées par voie sèche.

Tableau 1: Compositions des mélanges

Mélange	Ciment Type GU (%)	Pierre (%)	Sable (%)	Fumée de silice (%)	Cendre volante (%)	Polymère (g/kg _{liant})	E/L
M1	21,0	15,0	64,0	0,0	0,0	0,0	0,39
M2	18,9	15,0	64,0	2,1	0,0	0,0	0,51
M3	19,4	15,0	64,0	1,6	0,0	0,0	0,48
M4	14,4	15,0	64,0	1,6	5,0	0,0	0,53
M5	19,4	15,0	64,0	1,6	0,0	20,0	0,44

2.2 Procédure des essais

2.2.1 Propriétés mécaniques et absorption

La résistance à la compression, la résistance à la traction et le module élastique ont été déterminés sur des carottes sont prélevées dans un panneau de projection de 600 x 600 x 125 mm, aux échéances de 3, 7 et 28 jours. Trois éprouvettes ont été testées pour chaque essai, à chacune des échéances. Par ailleurs, le volume des vides perméables a été évalué à 28 jours pour chacun des mélanges, suivant les recommandations de la norme ASTM C642.

2.2.2 Essais de retrait libre

Les essais de retrait libre des différents mélanges sont réalisés au d'éprouvettes annulaires de géométrie similaire à celle de l'anneau restreint de la norme AASHTO T334-08, à la différence que l'anneau interne rigide a été remplacé par un cylindre en polystyrène expansé de même dimension (Menu et al., 2017). Aussitôt que le séchage débutait, des plots (type DEMEC) étaient installés sur la face supérieure de l'anneau de béton pour la mesure des déformations. La mesure de longueur initiale est prise immédiatement après l'application des plots (immédiatement après la fin de la cure). Ensuite, les déformations lors du séchage ont été mesurées régulièrement tout au long la durée de l'essai, soit pendant environ 70 jours.

2.2.3 Essais de retrait restreint

Parallèlement, les essais de retrait restreint sont effectués au moyen d'une éprouvette annulaire selon la norme AASHTO T334-08 (AASHTO, 2008). Dans une étude antérieure au CRIB de l'Université Laval (Girard, 2013), la procédure de la norme AASHTO T334-08 a été adaptée pour mesurer le bilan des déformations des bétons projetés en

conditions de retrait empêché. L'essai consiste essentiellement à mouler une éprouvette de béton cylindrique autour d'un anneau rigide en acier (voir la Fig. 1, b). L'anneau d'acier interne empêche la contraction libre du béton lors du séchage. En réponse à la restriction, des contraintes se développent à l'intérieur du béton. L'anneau fissurera si les contraintes maximales surpassent la résistance en traction du béton. Dans le cadre de cette étude, deux éprouvettes annulaires retrait empêché ont été préparées pour chacun des mélanges testés. Après projection, les éprouvettes ont été recouvertes de jutes humides et feuilles de plastique pour une période de cure de 24 heures. Elles ont été démoulées au bout de 24 heures et immédiatement recouvertes de jutes humides et de feuilles de plastique pour 2 jours supplémentaires. Une fois la cure humide terminée, les anneaux ont été recouverts au moyen d'aluminium auto-adhésif sur leur face supérieure, laissant comme seule surface d'échange hygrométrique la face circonférentielle, et exposés au séchage dans une chambre contrôlée (50% R.H. à 21°C). La mesure de la déformation des éprouvettes est effectuée à l'aide de jauges de déformation installées à mi-hauteur de la face intérieure de l'anneau d'acier, avec une saisie automatique des données se font toutes les 5 minutes. Outre le fait de donner accès au bilan des déformations, l'enregistrement continu de la déformation dans l'anneau d'acier permet la détection précise du moment de fissuration.



a)



b)

Fig. 1: Éprouvettes annulaires pour les essais de retrait libre (gauche) et de retrait restreint (droite)

Si on connaît les déformations en conditions libres et empêchées, on peut en déduire l'évolution des contraintes moyennes dans le béton et dans l'acier et la capacité de relaxation par fluage dans le béton. L'évolution de la contrainte moyenne dans le béton se calcule ainsi (Menu et al., 2017) :

$$[1] \quad \sigma_{b_moy}(t) = -\frac{1}{2} \frac{A_a}{A_b} E_a \varepsilon_a(t) \frac{R_{ea} + R_{ia}}{R_{ea}}$$

Les termes ε_a , et E_a représentent respectivement la déformation moyenne de la face intérieure de l'anneau d'acier mesurées avec les jauges et le module élastique de l'acier.

Les paramètres géométriques A_a et A_b sont les sections transversales des anneaux d'acier et de béton, et R_{ia} et R_{ea} sont respectivement les rayon intérieur et extérieur de l'anneau en acier. La relaxation correspond à la différence entre la contrainte moyenne réelle (éq. 1) et la contrainte moyenne théorique qui serait générée dans le béton s'il était strictement élastique. La contrainte moyenne théorique générée dans le béton en absence du soulagement par fluage est calculées au moyen de l'équation (2). L'expression détaillée dépasse le cadre de cet article et sera présentée dans un article à paraître sous peu.

$$[2] \quad \sigma_{\text{theo}_{el}}(t) = \frac{\frac{(R_{ea}+R_{eb})}{R_{eb}^2-R_{os}^2} \varepsilon_{sh}(t)}{\frac{1}{E_a} \left(\frac{R_{ea}^2+R_{ia}^2}{R_{ea}^2-R_{ia}^2} + \nu_a \right) + \frac{1}{E_b(t)} \left(\frac{R_{eb}^2+R_{ea}^2}{R_{eb}^2-R_{ea}^2} - \nu_b \right)}$$

où E_b est le module élastique du béton, R_{eb} est le rayon extérieur de l'anneau du béton, ν_s (≈ 0.3) et ν_c sont respectivement les coefficients de Poisson de l'acier et du béton. Pour le calcul de la relaxation en fonction du temps, l'évolution des paramètres d'entrée du calcul tel que le retrait et le module d'élasticité (mesurés expérimentalement à différentes échéances) sont exprimées au moyen de fonctions de lissage, la première de type exponentiel ($t^{1/2}$) et la seconde de type logarithmique ($\ln(t)$).

3. RÉSULTATS ET DISCUSSION

3.1 Caractérisation du béton à l'état durci

La Fig. 2 présente les résultats des essais de résistance en compression et en traction à 3, 7, et 28 jours pour les cinq mélanges étudiés. Le premier constat possible est la corrélation entre les paramètres des formulations et les propriétés mécaniques. Sans surprise, on remarque dans la figure que les d'ajouts minéraux (FS et CV) et organiques (POL) affectent la cinétique du développement des résistances mécaniques. Le développement des propriétés mécaniques est beaucoup plus lent pour les mélanges avec fumée de silice et cendre volante, avec des résistances à 3 et 7 jours largement plus faibles que celles des mélanges sans ajout.

On remarque également que le mélange avec fumée de silice seule présente des résistances supérieures aux mélanges avec cendre volante et fumée de silice. Les résultats plus faibles des mélanges contenant de la cendre volante sont encore une fois dus à l'action pouzzolanique plus lente de la cendre volante comparativement à celle de la fumée de silice. Toutefois, c'est le mélange avec le plus fort dosage en fumée de silice (M2) qui dispose du développement de sa résistance le plus lent. On remarque également que l'ajout de fumée de silice a permis d'augmenter la résistance à la traction de 8%. La combinaison de fumée de silice et polymère a permis de l'augmenter 12%, alors que l'ajout de cendre volante et fumée de silice l'a diminué de 11%.

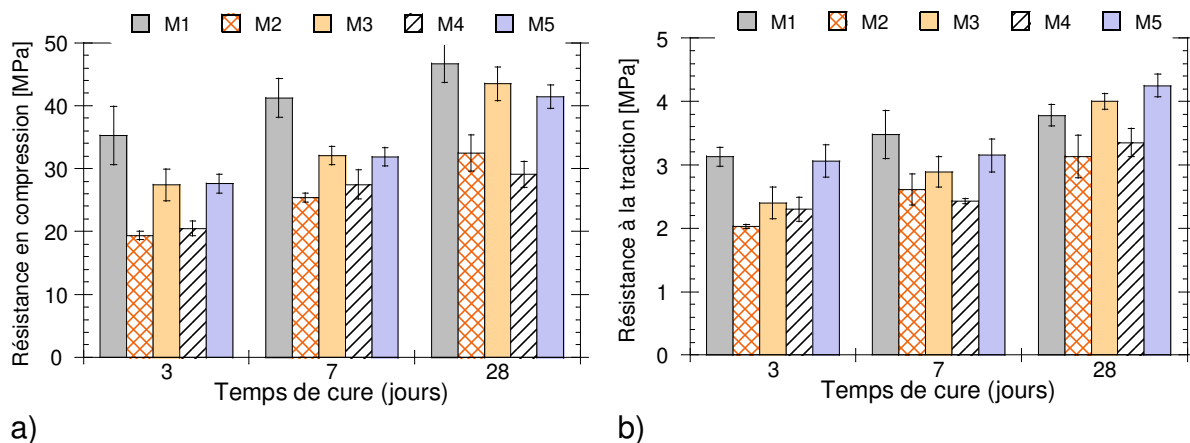


Fig. 2: Effet des ajouts cimentaires sur les résultats des mesures a) de résistance à la compression; et b) de résistance à la traction

Le [Tableau 2](#) présente les résultats des essais de détermination du module élastique à 28 jours. On observe sensiblement les mêmes tendances pour les modules élastiques que pour les résistances mécaniques, exception faite du mélange avec cendre volante, dont le module excède celui des autres mélanges.

Tableau 2 : Module élastique des mélanges à 28 jours

Mélanges	M1	M2	M3	M4	M5
Module élastique [GPa]	32.6 ±0.6	22.3 ±1.2	28.6 ±1.1	32.7 ±1.4	27.8 ±0.3

3.2 Retrait libre et perte de masse

Les résultats des mesures de perte de masse et de retrait libre obtenus pour chaque mélange sont présentés à la [Fig. 3](#), (a) et (b). Chaque courbe de cette figure correspond à la moyenne des résultats de deux éprouvettes. Les comportements observés des différents mélanges à l'étude sont très différents, aussi bien en ce qui a trait à la perte en masse qu'au retrait. Pour les pertes de masses présentées à la [Fig. 3 a\)](#), comparativement à ce qu'on observe dans le béton de référence, on remarque une perte importante d'eau avec l'emploi de cendre volante, alors que l'ajout de polymère a fortement ralenti le départ de l'eau. On remarque également que les courbes de perte de masse des deux mélanges avec fumée de silice seule (M2 et M3) sont similaires. Les tendances observées pour les résultats des essais de retrait libres diffèrent passablement de celles relevées pour les mesures de perte de masse. Les résultats de la [Fig. 3 b\)](#) montrent entre autres que la cendre volante et le polymère ont permis de réduire le retrait. À l'opposé, les mélanges avec de la fumée de silice seule (soit M2 et M3), ont développé des déformations nettement plus élevées que celles enregistrées pour le mélange de référence et les mélanges M4 (FS+CV) et M5 (FS+POL). Le mélange de référence

présente quant à lui une cinétique de retrait très importante en début de séchage (jusqu'à 3 jours), suivie d'un net ralentissement.

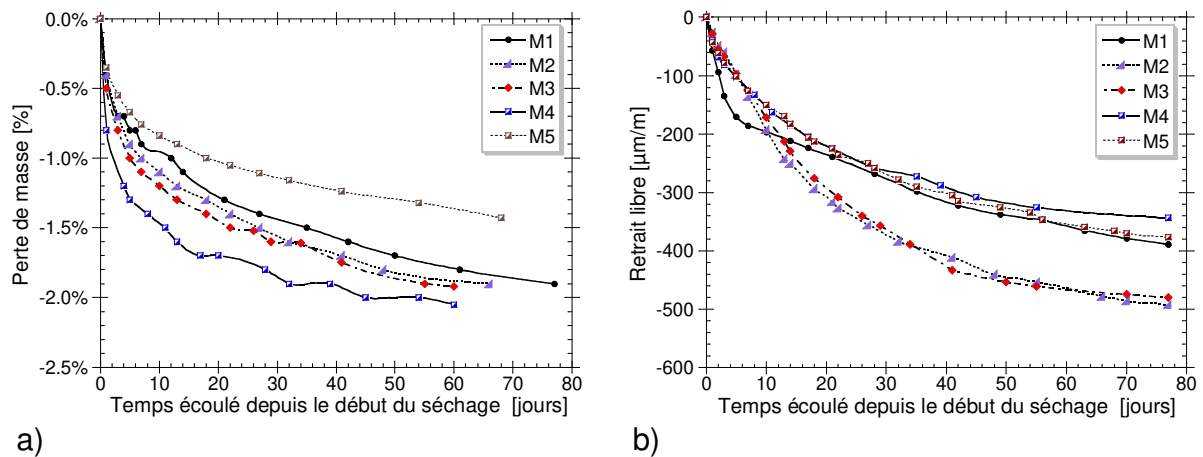


Fig. 3: Résultats des mesures de a) de perte en masse; et b) de retrait libre sur éprouvettes annulaires exposées à 50 % H.R. après 3 jours de mûrissement humide

En comparant les pertes de masse et les retraits correspondants, on réalise l'absence de relation simple entre les deux phénomènes ([Gadri et Guettala, 2014](#)). D'une part, les deux bétons avec fumée de silice (M3 et M3) ont développé des retraits plus importants alors que la perte de masse est relativement peu élevée. D'autre part, le mélange M4 présente le plus faible retrait, mais la plus grande perte de masse tandis que le mélange M5 présente un faible retrait et une faible perte de masse. Ces observations tendent encore une fois à confirmer le fait que le phénomène de retrait lors du séchage du béton n'est clairement pas proportionnel à la quantité d'eau évaporée (ou perte de masse) ([Gadri et Guettala, 2014](#); [Neville, 2011](#)).

3.3 Sensibilité à la fissuration du béton projeté

Dans le cadre de cette étude, au moins deux anneaux ont été préparés lors de chacune des projections. La [Fig. 4 a\)](#) montre la déformation moyenne générée dans les éprouvettes annulaires restreintes en fonction de la durée de séchage. Les graphiques illustrés sont préparés à partir des déformations moyennes enregistrées par quatre jauges. Il apparaît que la sensibilité à la fissuration en jeune âge est plus importante pour les mélanges avec ajouts (FS, CV, POL). Ce comportement pourrait être expliqué, du moins en partie, par leur cinétique d'hydratation relativement lente (développement en conséquence ralenti de la résistance en traction) et, en contrepartie, à l'évolution malgré cela assez rapide de leur retrait dès les premières heures de séchage. On observe que le mélange de référence (M1) présente la résistance à la fissuration la plus élevée. Le remplacement du ciment par de la fumée de silice, de la cendre volante ou du polymère semble donc avoir un effet défavorable sur le potentiel de fissuration du béton projeté. Malgré le fait que les mélanges avec des ajouts présentent un fort potentiel de fissuration,

on constate que la combinaison de la fumée de silice avec cendre volante ou polymère améliore résistance à la fissuration par rapport à l'utilisation de fumée de silice seule. Il faut noter que l'emploi de ces ajouts cimentaires (FS, CV, POL) est intéressant d'un point de vue économique puisqu'ils permettent de réduire la perte de matériau liée au rebond.

La Fig. 4 b) présente les différents temps de fissuration enregistrés. Le graphique contient les temps de fissuration moyens de deux éprouvettes pour chacun des mélanges. Tel que montré aux Fig. 4 b) les mélanges M2, M3, M4 et M5 ont fissuré après seulement 6 jours de séchage, tandis que le mélange M1 a fissuré après plus de 25 jours. Les observations suggèrent que les ajouts pouzzolaniques et de polymère considèrent diminuent la résistance à la fissuration du mélange de béton projeté de base utilisé dans l'étude. En effet, on peut remarquer sur la figure que le mélange de référence (M1) présente les temps de fissuration les plus élevés. Malgré le fait que le mélange M1 présente le plus fort retrait en conditions libres, on constate que le retrait restreint y est faible. Au contraire, les mélanges M4 et M5 présentent un faible retrait en conditions libres, mais importantes en conditions restreintes. Cela renforce le concept suivant lequel la connaissance du retrait libre seul ne suffit pas à qualifier le risque de fissuration.

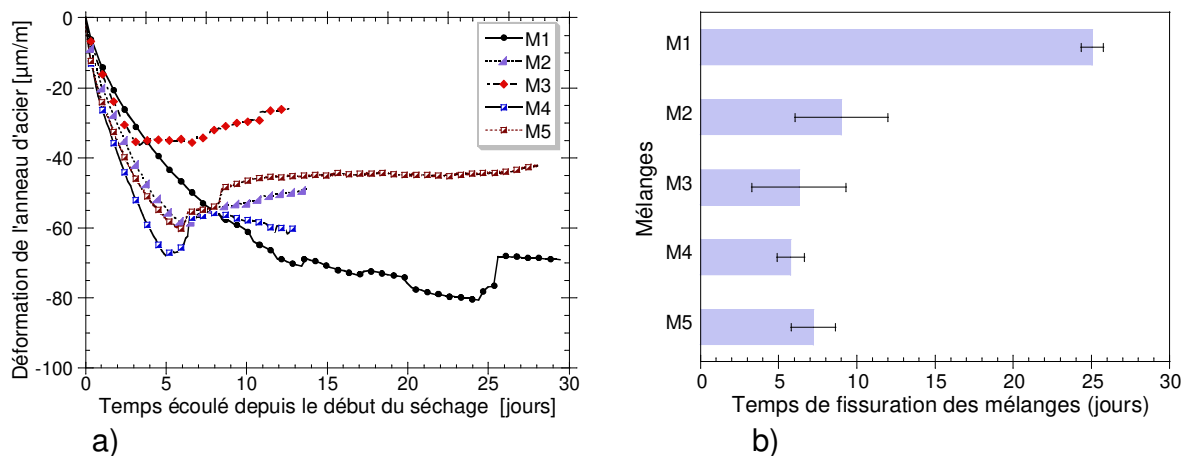


Fig. 4: Résultats des essais de retrait restreint AASHTO T334-08 modifié (50 % H.R.; 3 jours de mûrissement humide) - a) évolution de la déformation moyenne dans l'anneau d'acier; b) temps de fissuration moyen du béton

Afin de mieux comprendre les résultats, la relaxation des contraintes en traction en cours d'essai a été évaluée. Tel que mentionné plus haut, le calcul de la relaxation dans la présente analyse correspond à la différence entre les contraintes réelles déterminées expérimentalement (éq. [1]) et les contraintes théoriques (éq. [2]) qui se développeraient si le matériau avait un comportement strictement élastique. La relaxation des contraintes est exprimée ici en pourcentage de la contrainte théorique calculée, tel que montré sur les graphiques de la Fig. 5. On observe un accroissement significatif de la capacité de relaxation par fluage pour le mélange de référence (Fig. 5 a)). Au contraire, on note de très faibles valeurs de relaxation pour les mélanges avec des ajouts cimentaires. En

résumé, les résultats démontrent que la capacité de relaxation diminue avec la substitution du ciment par les ajouts cimentaires. En effet, l'ajout de fumée de silice au mélange de base (M3) a réduit de manière draconienne la relaxation. De plus, l'accroissement de la teneur en fumée de silice (M2) a réduit encore davantage la capacité de relaxation. On constate que l'ajout de cendre volante (M4) a résulté en la capacité de relaxation la plus faible. L'ajout de polymère (M5) a permis d'augmenter significativement la capacité de relaxation par rapport à celle du mélange avec fumée de silice seule (M3), mais cela demeure très faible comparativement à ce qu'on calcule pour le mélange de référence. En fait, la substitution partielle du ciment par l'ajout de fumée de silice diminue la capacité de relaxation d'environ 97% tandis que les combinaisons fumée de silice - cendre volante et fumée de silice - polymère la diminue d'environ 99% et 86% respectivement. On peut donc attribuer la plus forte tendance à la fissuration des mélanges avec ajouts à la perte de capacité de relaxation des contraintes et donc, vraisemblablement, à une diminution sensible des coefficients de fluage. Il importe toutefois souligner que le taux de retrait et le degré de restriction peuvent avoir une influence sur le risque et le caractère hâtif de la fissuration.

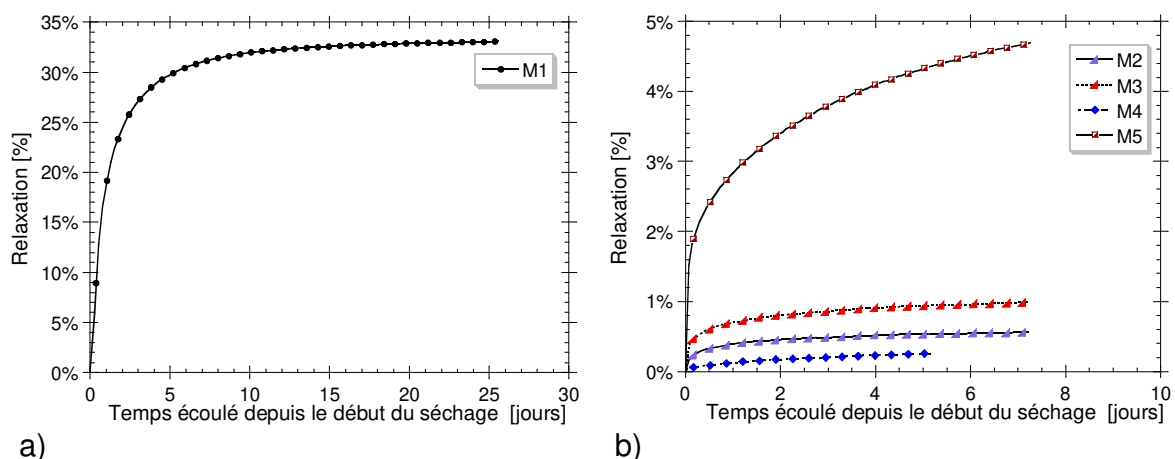


Fig. 5: Relaxation de la contrainte moyenne dans l'anneau de retrait restreint calculée pour a) le mélange de référence (M1); et b) les mélanges avec ajout(s) (M2, M3, M4, M5)

CONCLUSION

Cet article présente des résultats d'une étude visant à caractériser de manière quantitative le risque de fissuration précoce dans les bétons projetés. À la lumière de ce qui précède, on doit conclure que la sensibilité à la fissuration du béton projeté au jeune âge est potentiellement accrue par l'utilisation d'ajouts minéraux et agent polymériques en remplacement du ciment Portland. Les résultats expérimentaux générés démontrent en effet que la substitution de ciment par ces ajouts, qui présentent par ailleurs différents avantages technologiques, peut nuire à la capacité de relaxation par fluage des contraintes de traction se développant en situation de retrait empêché. Ces conclusions

permettent de soulever les leviers importants en vue d'une prise en compte plus rigoureuse des propriétés déformationnelles dans la mise au point et l'optimisation des mélanges de béton projeté.

REMERCIEMENTS

Les auteurs tiennent à remercier le Conseil de Recherche en Sciences Naturelles et en Génie du Canada (CRSNG) et KPM Industries Ltd. pour leur soutien financier. Les auteurs tiennent également à souligner la contribution technique essentielle de MM. Mathieu Thomassin, René Malo et Pierre-André Tremblay.

RÉFÉRENCES

- AASHTO, AASHTO-T334-08. Standard Practice for Estimating the Crack Tendency of Concrete, *AASHTO Provisional Standards*, 2008.
- Ansell, A., Investigation of shrinkage cracking in shotcrete on tunnel drains, *Tunnelling and Underground Space Technology*, 25(5), 607-613, 2010.
- Bolduc, L.-S., Jolin, M., & Bissonnette, B., Évaluation de la performance du béton projeté, *(RF)²B*, ENS Cachan, France, 2009.
- Gadri, K., & Guettala, A. (2014). *Etude des caractéristiques physico-mécaniques des bétons de sable à base de fumée de silice*. Paper presented at the MATEC Web of Conferences.
- Girard, S., *Etude du bilan deformationnel des bétons projetés*, Mémoire de Maîtrise, Université Laval, 2013.
- Menu, B., Jolin, M., & Bissonnette, B., Studies on the influence of drying shrinkage test procedure, specimen geometry, and boundary conditions on free shrinkage, *Advances in Materials Science and Engineering*, 2017, 9, 2017.
- Menu, B., Jolin, M., Bissonnette, B., & Ginouse, N., Evaluation of early age shrinkage cracking tendency of concrete, *CSCE annual conference*, Vancouver, 2017.
- Messan, A., Ienny, P., Buisson, C., Couturier, P., Slangen, P., & Wienin, J.-S., Développement d'un banc d'essai de retrait empêché: relation entre formulation et fissurabilité des bétons au jeune âge, *Congrès Français de Mécanique (CFM)*, Marseille, 2009.
- Neville, A. M., *Properties of concrete*, 5th ed., Pearson, Harlow, England, 2011.