

Vers l'évaluation de la durée de vie des bétons projetés

Patrick Power¹, Marc Jolin²

Résumé

Les propriétés de transport de huit mélanges représentatifs de l'industrie du béton projetés ont été caractérisées en tandem avec des mélanges équivalents de béton coulés en place. Un procédé de remalaxage du matériau frais après projection a été développé afin de produire des mélanges de dosage équivalent coulé en place. Les propriétés de transport mesurées sont entrées dans le logiciel STADIUM® pour estimer la durée de vie des mélanges de béton projetés et coulés dans une variété de conditions d'expositions au Québec. Les résultats soulignent l'importance de la relation entre les conditions d'expositions d'un élément en béton et ses propriétés de transport et confirment la nécessité du développement de nouveaux critères d'évaluation et d'acceptation pour les bétons projetés.

1 Introduction

Employé souvent sous terre dans un contexte minier ou dans la construction d'ouvrages hydriques, le béton projeté est aussi une technique souvent employée pour la réparation d'ouvrages d'art. L'avantage principal de cette technologie est la possibilité d'effectuer des réparations rapides avec souvent très peu ou pas de coffrage.

En effet, cette méthode de mise en place pneumatique fait intervenir des phénomènes qui ne sont pas retrouvés lors d'une mise en place conventionnelle. La projection des matériaux à haute vitesse génère une importante énergie de compaction qui est responsable de l'homogénéité et la qualité du béton en place. Ce procédé génère cependant du rebond, un phénomène complexe qui peut, dans certains cas, augmenter significativement la teneur en pâte du matériau en place.

Après plus d'un siècle d'utilisation, plusieurs professionnels s'interrogent sur les méthodes à employer afin d'évaluer la qualité d'un mélange de béton projeté. Aujourd'hui, les devis prescriptifs tels ceux proposés par Morgan et coll. (1987) établissent des valeurs minimales à rencontrer suite à l'évaluation du matériau par essais standardisés (Tableau 1).

Tableau 1: Indicateurs de qualité proposés par Morgan et coll. (1987) pour les béton projetés

Qualité du béton projeté	Volume de vides perméables* (%)	Absorption d'eau* (%)
Excellente	< 14	< 6
Bonne	14-17	6-8
Acceptable	17-19	8-9
Marginale	> 19	> 9

* tel que mesuré selon l'essai ASTM C642- *Standard Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete*

¹ SIMCO Technologies; ppower@simcotechnologies.com

² Département de génie civil et génie des eaux, Université Laval; Marc.Jolin@gci.ulaval.ca

Bien qu'il soit reconnu que le béton projeté produit un matériau de grande qualité, et ce, même dans des conditions d'expositions sévères, cette pratique peut parfois mener à deux erreurs décisionnelles en raison de certains biais intrinsèques de ces essais :

- Un bon matériau pourrait être rejeté sur la base d'un résultat d'essai non-conforme;
- Un mauvais matériau pourrait être accepté en dépit de défauts non évalués par l'essai.

Au cœur d'un questionnement répandu dans l'industrie, cette problématique continue à être étudiée dans le cadre d'une série de projets de recherche à l'Université Laval. Suite à une première étude par Bolduc (2009), le présent projet de recherche a été entrepris. Les objectifs de ce projet de recherche sont de:

- Reproduire et étendre les résultats obtenus par Bolduc (2009);
- Évaluer les propriétés de transport de plusieurs mélanges de béton projetés représentatifs de l'industrie;
- Évaluer les propriétés de transport de mélanges équivalents coulés en place.

Pour ce faire, cinq mélanges de béton projetés par voie sèche (consistances sèche et humide) et 3 mélanges de béton projetés par voies humides ont été employés. De plus, un protocole de remalaxage du matériau fraîchement projeté a été développé afin de reproduire un matériau coulé en place de dosage équivalent au matériau projeté après projection.

Une synthèse de certains résultats d'essais caractérisant les propriétés de transport des mélanges de béton projeté et remalaxés est présentée. De plus, en s'appuyant sur l'évaluation des propriétés de transport d'une gamme de matériaux à dosage variable, les résultats de calculs du logiciel de prédiction de durée de vie STADIUM® sont présentés.

2 Protocole expérimental

2.1 Matériaux et méthodes

Cinq mélanges de béton projetés par voie sèche et trois mélanges de béton projetés par voie humide obtenus de l'industrie ont été étudiés.

Tableau 2: Dosage des mélanges étudiés dans le cadre du projet de recherche

Mélanges (voie sèche)	Mélanges (voie humide)
Mortier de ciment projeté type « Gunite »	
Mortier de ciment projeté	Mortier de ciment projeté
Béton projeté avec ciment	Béton projeté avec ciment
Béton projeté avec ciment et 8% de fumée de silice	Béton projeté avec ciment et 8% de fumée de silice
Béton projeté avec ciment, 8% de fumée de silice et 12% de cendre volante	

À l'exception des mortiers, tous les mélanges par voie sèche ont été projetés à la fois avec une consistance humide et une consistance sèche. La consistance humide fait référence à « la consistance la plus humide qui puisse rester en place ».

Pour chaque projection, plusieurs panneaux rectangulaires ont été remplis de matériau par projection. Une partie du matériau placé par projection dans les moules a été remalaxé immédiatement après la projection afin de reproduire un matériau équivalent, c'est-à-dire ayant subi la même variation en teneur granulaire due au phénomène de rebond (Figure 1).

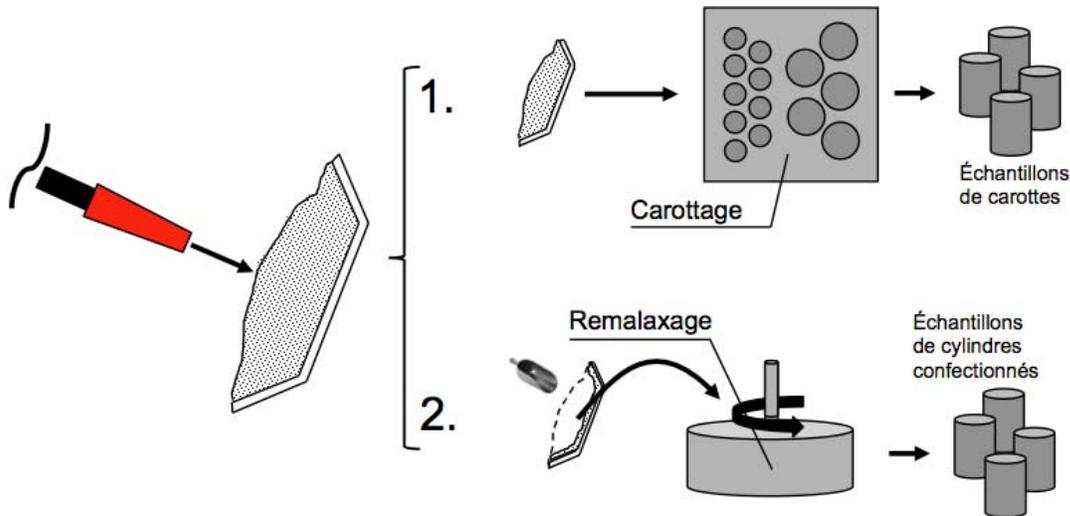


Figure 1 : Procédé de remalaxage. Le matériau est projeté avec des paramètres de projection constants dans des moules rectangulaires (gauche) en vue de produire des carottes de béton projeté (droite, 1) et du matériau remalaxé (droite, 2). Une partie du matériau frais est extrait à l'état frais pour remalaxer dans un malaxeur planétaire avant de produire une série de cylindres standardisés.

Ainsi, une série d'échantillons provenant de carottes prélevées de panneaux de matériau projeté et une série de cylindres confectionnées suite au remalaxage ont été utilisés pour la gamme d'essais du protocole de recherche. Tous les échantillons ont subi une cure standardisée pour une période de 7 à 56 jours selon l'échéance de l'essai.

2.2 Essais

Plusieurs essais ont été menés autant sur le matériau projeté à l'état frais que sur les échantillons de bétons projetés et remalaxés. Les essais sur le béton à l'état frais ont permis de caractériser le dosage en place du matériau après projection, tandis que les essais effectués sur les échantillons de béton durci ont permis de caractériser les propriétés mécaniques et de transport du béton.

Les essais effectués dans le cadre du protocole expérimental pour le matériau durci sont présentés dans le Tableau 3.

Tableau 3 : Plusieurs essais effectués dans le cadre du protocole expérimental du projet de recherche

Paramètre évalué	Nom de l'essai
Résistance en compression	ASTM C39 et ASTM C42
Absorption d'eau et volume de vide perméables	ASTM C642
Rapid Chloride Penetration Test	ASTM C1202
Essai de migration accéléré	ASTM C1202 (Modifié) *
Essai de séchage	-*

**Essais effectués pour calculs STADIUM ®*

À l'exception des essais de compression à 7 et 28 jours, tous les échantillons ont été évalués suite à une cure standardisée de 56 jours.

3 Résultats

3.1 Propriétés de transport

Une synthèse des propriétés de transport de certains mélanges évalués dans le cadre de ce projet est présentée dans cette section. Les propriétés en questions sont:

- L'absorption capillaire, mesurée par l'essai d'absorption;
- Le potentiel de diffusion ionique, évaluée par l'essai de migration accélérée

La Figure 2 (page suivante) présente les moyennes d'absorption des échantillons de béton projeté et projeté-remalaxés pour certains mélanges de béton projeté par voie sèche. Ces résultats ne démontrent pas une différence significative entre les éprouvettes de béton projeté et les éprouvettes de béton remalaxés. Selon les critères du Tableau 1, tous les mélanges présentent une qualité d'au moins « Acceptable », et les mélanges contrôles présentent une qualité « Excellente ».

De même, la Figure 3 (page suivante) présente la moyenne des coefficients de diffusion ioniques, D_{OH^-} , pour les éprouvettes de béton projeté et projeté-remalaxé pour certains mélanges par voie sèche. Ces résultats démontrent qu'hormis pour le mélange ternaire, les propriétés diffusives des bétons projetés et projeté-remalaxés ne présentent pas de différence significative.

Selon les critères de valeur d'absorptions proposées par Morgan (1987), le mélange présentant le meilleur indice de qualité est le mélange contrôle, consistance sèche ou humide. Cependant, sur la base des propriétés diffusives, les mélanges ternaires seraient préférables. Cette situation est problématique : quelle propriété devrait être considérée?

Cette question est évoquée par Bolduc (2009) et est fondamentale à la problématique de cette recherche. Afin de répondre à cette question, il est nécessaire de considérer non-seulement les trois propriétés de transport du matériau simultanément, mais aussi les conditions d'exposition auxquelles sera soumis le matériau. Vu la complexité de cette approche, une approche faisant appel aux outils du logiciel STADIUM® a été employée.

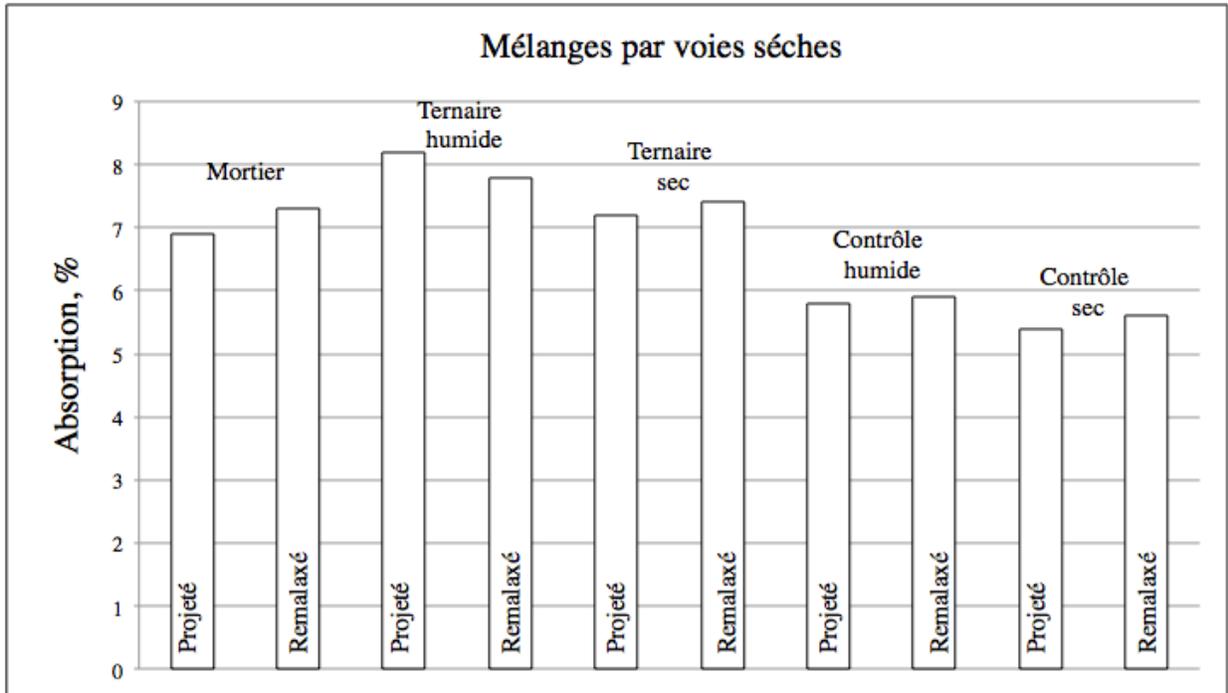


Figure 2 : Moyennes des résultats d'absorption pour trois mélanges de béton projeté par voie sèche, dont deux à des consistances sèches et humides

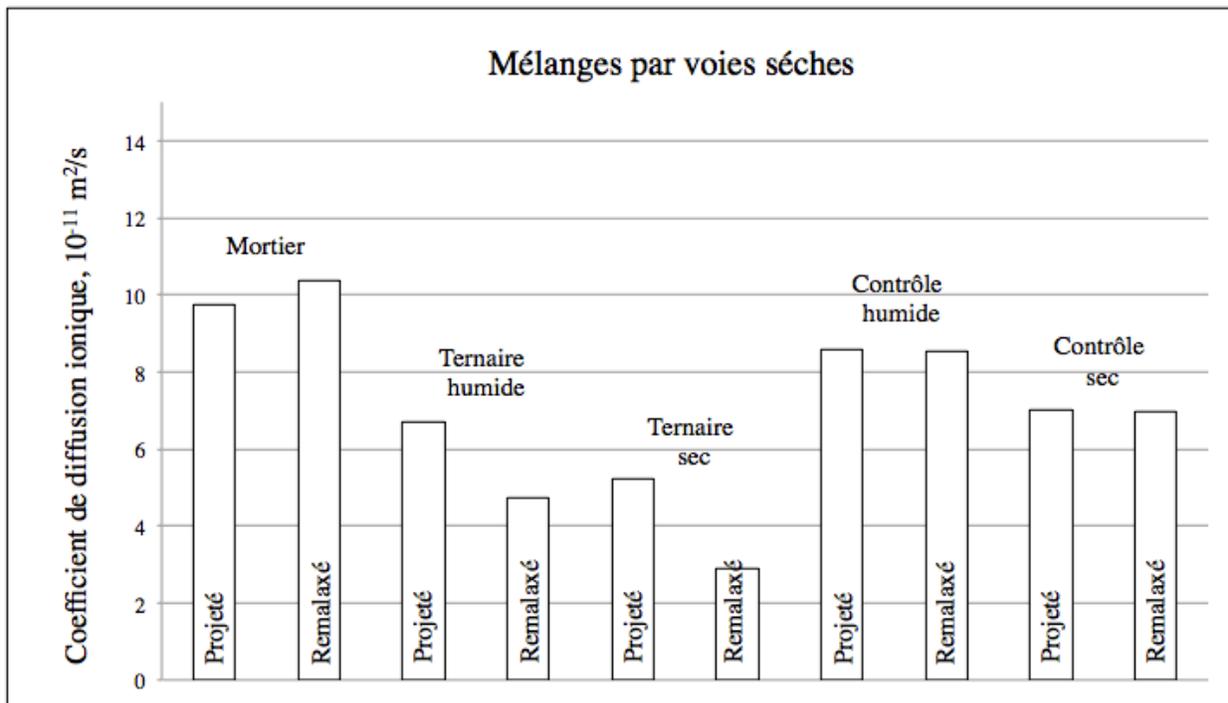


Figure 3 : Moyennes des coefficients de diffusion ionique pour trois mélanges de béton projeté par voie sèche, dont deux à des consistances sèches et humides

3.2 Analyse de durée de vie

Afin de procéder à une analyse plus poussée, le logiciel STADIUM® a été employé pour considérer à la fois les propriétés de transport du matériau et les conditions d'exposition. Plusieurs conditions d'expositions et géométries ont été sélectionnés pour effectuer des calculs itératifs de pénétration d'agents agressants. À ce stade de l'analyse, la qualité d'un mélange de béton a été considérée en fonction de sa capacité à résister la pénétration d'ions chlorures dans un contexte de corrosion des armatures. Selon le scénario de calcul choisi, les sels déglaçant ou l'eau de mer sont la source d'ions chlorures.

La figure 4 présente un scénario d'exposition et de géométrie utilisée dans le cadre du projet de recherche. Une pile de pont constituée de même matériau est soumise à un climat maritime auxquelles trois conditions d'expositions sont appliquées. Selon la condition d'exposition, les mouvements de l'eau dans le matériau peuvent accélérer ou ralentir la vitesse de pénétration des ions chlorures dans la matrice cimentaire.

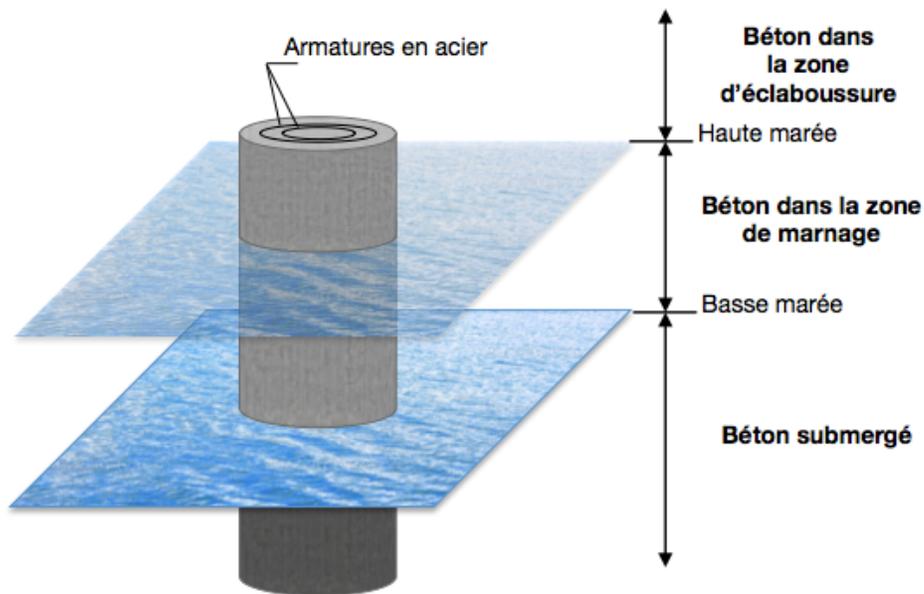


Figure 4: Scénario de pile de pont avec trois conditions d'exposition

Les résultats des calculs effectués par STADIUM® avec les propriétés de transport du mélange contrôle, projeté par voie sèche aux consistances sèches et humides, et pour une condition d'exposition submergée sont présentées à la Figure 5 (page suivante). Les résultats indiquent que le matériau contrôle projeté à une consistance sèche présente une meilleure capacité à résister la pénétration d'ions chlorures. De plus, les mélanges projetés et projeté-remalaxés démontrent une capacité équivalente tout au long de la période d'analyse de 50 ans.

La figure 6 (page suivante) montre les résultats des calculs effectués par STADIUM® pour les mêmes mélanges, mais cette fois-ci pour la zone de marnage. Les résultats montrent que les mélanges projetés et projeté-remalaxés à une consistance sèche offrent une performance équivalente pour la période d'analyse considérée. Toutefois, on observe une différence notable

entre les mélanges contrôle de consistance humide projetés et projeté-remalaxés. Cette différence peut s'expliquer par les propriétés de transport légèrement favorables dans le cas du mélange projeté-remalaxé, autant pour les propriétés diffusives ($D_{OH}=8.6*10^{-11}$ m²/s pour le mélange projeté-remalaxé, contre $D_{OH}=8.7*10^{-11}$ m²/s pour le mélange projeté) et de perméabilité intrinsèque ($K'=5.7*10^{-22}$ m² pour le mélange projeté-remalaxé, contre $K'=6.1*10^{-22}$ m² pour le mélange projeté).

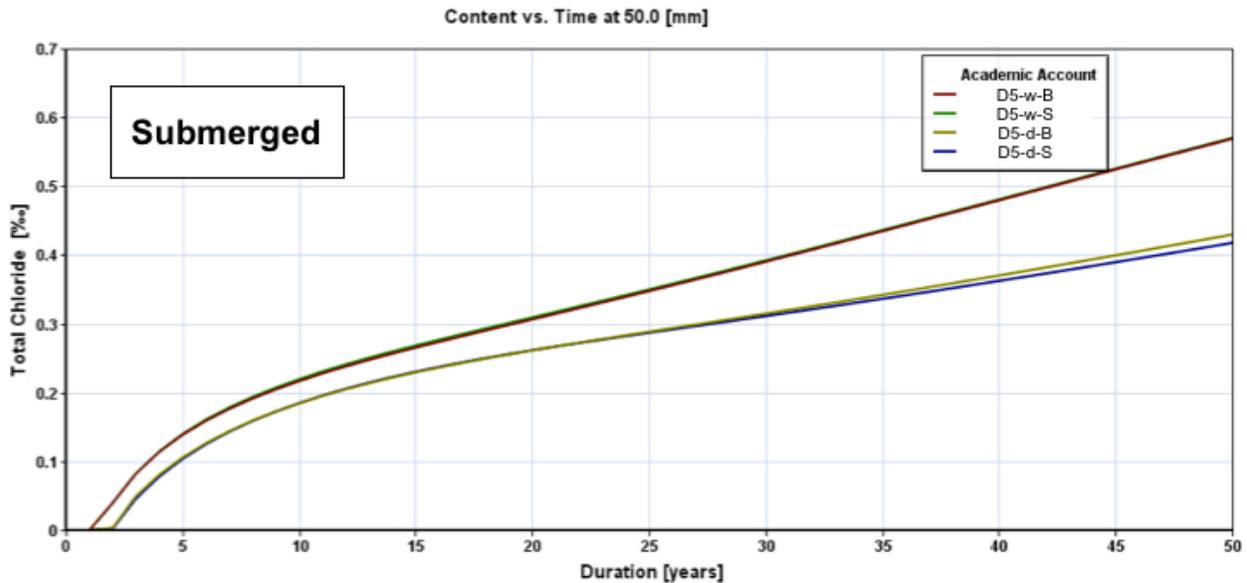


Figure 5 : Concentrations en ions chlorures pour deux mélanges de béton projeté et projeté-remalaxé dans la zone submergée d'une pile de pont en milieu maritime pour une période d'analyse de 50 ans. Le mélange en question est le mélange contrôle par voie sèche, projeté à deux consistances (sèche et humide).

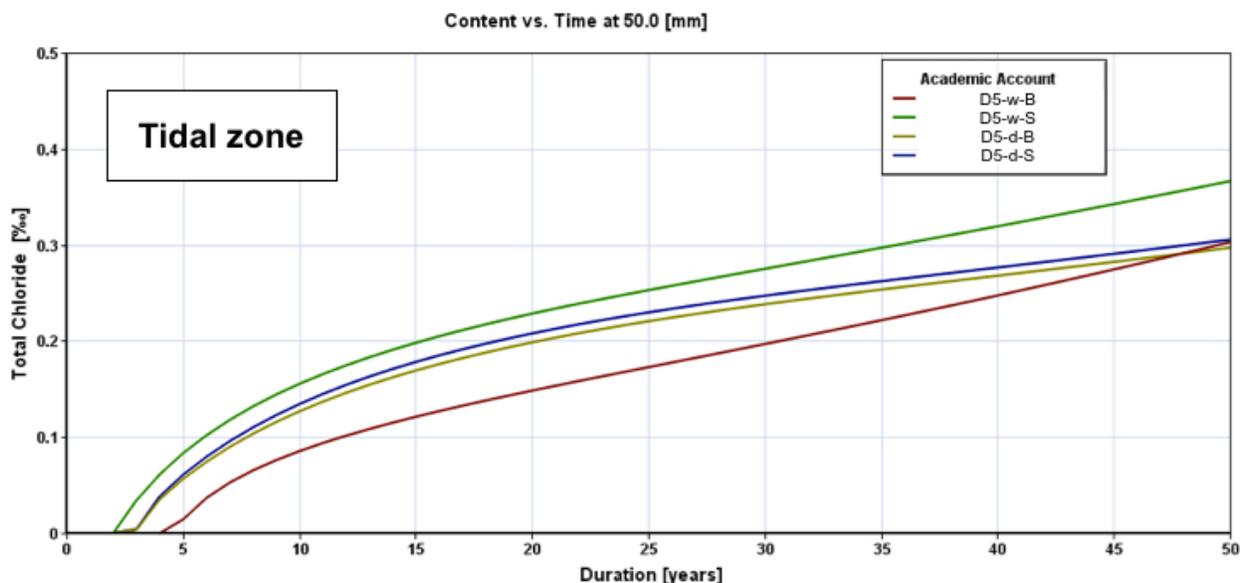


Figure 6 : Concentrations en ions chlorures pour deux mélanges de béton projeté et projeté-remalaxé dans la zone de marnage d'une pile de pont en milieu maritime pour une période d'analyse de 50 ans. Le mélange en question est le mélange contrôle par voie sèche, projeté à deux consistances (sèche et humide).

Toutefois, il est important de noter que dans ce cas les différences entre les propriétés de transport des deux mélanges en question sont très faibles. Néanmoins, le différent comportement montré à la Figure 6 entre ces mélanges est significatif, en dépit des faibles différences évaluées suite aux essais sur les échantillons des matériaux. Ce résultat souligne l'importance de considérer à la fois les propriétés du matériau ainsi que les conditions d'expositions prévues pour son utilisation.

4 Conclusion

Les conclusions suivantes peuvent être tirées de ce projet de recherche:

- Le dosage et la teneur en liant, autant pour le béton projeté que le béton projeté et projeté-remalaxé joue un rôle important sur les propriétés de transport;
- Les conditions d'exposition devraient autant être considérées de pair avec les propriétés de transport du matériau afin de refléter l'importance de la réponse du matériau aux sollicitations de l'environnement;
- On ne peut pas encore définir de critères simples pour la sélection de mélanges de béton projeté dans des contextes d'exposition parfois très complexes;
- Les mélanges de béton projeté performant très bien dans des conditions d'exposition sévères;
- Davantage de recherche est nécessaire afin de continuer à explorer les leviers qui permettront d'établir de nouveaux critères de qualité pour le béton projeté.

5 Références

Beaupré, D. and Jolin, J. (2001), *Effect of Shotcrete Consistency and Nozzleman Experience on Reinforcement Encasement Quality*, Shotcrete Magazine, Fall 2001, p. 20-22.

Bolduc, L.-S. (2009), *Étude des propriétés de transport du béton projeté*, Mémoire de maîtrise, Département de génie civil et génie des eaux, Université Laval, Canada, 167 pages.

Jolin, M. (1999), *Mechanism of placement and stability of dry process shotcrete*, Thèse de doctorat, Département de génie civil, University of British Columbia, Canada, 157 pages.

Glasser, F.P., Marchand, J. and Samson, E. (2008), "Durability of concrete - Degradation phenomena involving detrimental chemical reactions", *Cement and Concrete Research*, **38**(2), p. 226-246.

Morgan, D.R., McAskill, N., Neill, J. and Duke, N.F. (1987). *Evaluation of silica fume shotcrete*, Proc. International Workshop on Condensed Silica Fume in Concrete, Montreal, Canada, 34 pages.

Samson, É., Marchand, J. and Snyder, K. (2003), "Calculation of ionic diffusion coefficients on the basis of migration test results", *Materials and Structures*, **36**(3), p. 156- 165.

6 Remerciements

Les auteurs sont profondément reconnaissants de l'appui de SIMCO Technologies pour leur soutien tout au long du projet de recherche. De plus, les auteurs désirent remercier la Centre de recherche sur les infrastructures en béton (CRIB) dans la réalisation de ce projet.

