

Potentiel d'utilisation des liants ternaires dans le béton projeté

Frédéric Gagnon, Marc Jolin, Pascal Dorion, Denis Beaupré

Département de génie civil
Université Laval
Québec (Québec)
Canada, G1K 7P4

Téléphone: 418-656-3797

Télécopieur: 418-656-3355

Courriel: frederic.gagnon@gci.ulaval.ca

Résumé : Le béton projeté est un matériau de plus en plus populaire pour la réalisation de différents ouvrages du génie civil. Cette méthode de mise en place du béton s'améliore sans cesse et profite des développements récents dans le domaine du béton. Ces dernières années, l'industrie a été transformée par l'arrivée de nouveaux liants contenant une combinaison de ciment Portland, fumée de silice et cendres volantes et/ou laitiers de hauts fourneaux. Les ajouts minéraux sont souvent des rejets industriels et leur utilisation a un avantage environnemental non négligeable. L'industrie du béton projeté n'échappe pas à la tendance et emploie de plus en plus des ajouts minéraux dans ses mélanges.

L'article suivant démontre le potentiel d'utilisation des liants ternaires dans le béton projeté, tant pour le procédé sec que humide. L'évaluation des propriétés fraîches et durcies du béton projeté (pompabilité, rebond, résistance au cisaillement, temps de prise, résistance à la compression en bas âge, durabilité au gel-dégel, écaillage et résistance à la compression) montre que les liants ternaires ont un bon potentiel d'utilisation dans le béton projeté. Les liants ternaires n'ont pas d'effet négatif sur les propriétés générales du béton projeté, améliorent les propriétés fraîches du béton projeté et facilitent la projection comparativement à un mélange avec ciment Type 10.

1 Introduction

Les dirigeants d'industries de transformation ont le désir de disposer de leurs déchets de façon écologique et encouragent le développement de différents produits. Dans l'industrie du béton, ce mouvement environnemental s'est soldé par l'apparition d'additifs minéraux ajoutés au ciment. La fumée de silice, les cendres volantes et les laitiers de hauts-fourneaux font partie de ces additifs. Les cendres volantes sont des résidus obtenus lors de la combustion du charbon pulvérisé et utilisé dans les centrales thermiques. La fumée de silice est obtenue lors de la fabrication de certains produits siliceux et ce qui, autrefois, était un déchet est maintenant recherché par les producteurs de béton. Les laitiers de hauts-fourneaux sont quant à eux des sous produits de l'élaboration de la fonte. Ces ajouts minéraux ont des propriétés pouzzolaniques intéressantes. Les romains utilisaient déjà des pouzzolanes naturelles comme granulats, 200 ans avant J.-C., et ont constaté une amélioration de la résistance de leurs matériaux. Afin de voir les premières expérimentations au Canada, il a fallu attendre jusqu'en 1971, à l'Université de Sherbrooke.

En ajoutant un ou plusieurs ajouts minéraux au ciment, on obtient des liants binaires, ternaires, voir quaternaires. Au Québec, deux types de liants ternaires sont surtout utilisés et chacun d'eux contient du ciment Type 10, de la fumée de silice, des laitiers de haut-fourneaux ou des cendres volantes. Malgré le fait que leur commercialisation soit récente, les bétons formés de liants ternaires ont prouvé leur efficacité. On attribue aux bétons de liant ternaire des valeurs de retrait plus faible, une bonne durabilité et, de plus, une faible chaleur d'hydratation. Évidemment, l'industrie du béton projeté n'est pas indifférente à l'arrivée de ces nouveaux liants. Les travaux de recherche qui suivent visent à évaluer le potentiel d'utilisation des liants ternaires dans le béton projeté par voie sèche et par voie humide.

2 Expérimentation

Cet article présente un résumé de plusieurs résultats obtenus dans le cadre de différents projets réalisés dans le laboratoire du Centre de Recherche sur les Infrastructures en Béton du département de Génie civil de l'Université Laval. Le potentiel d'utilisation des liants ternaires a surtout été vérifié en béton projeté par voie sèche. Le potentiel d'utilisation dans le procédé humide a quant à lui davantage été vérifié par le ministère des Transport du Québec, en chantier et en laboratoire, et les résultats clés seront présentés dans cet article. Les résultats pour les deux différents types de béton projeté sont présentés successivement dans les sections suivantes.

3 Procédé sec

Le principal objectif de recherche est de comparer les performances de bétons projetés par voie sèche faites avec différents liants. Des mélanges de béton projeté par voie sèche faits de liants ternaires sont comparés à des bétons projetés plus conventionnels. Deux types de liants ternaires sont utilisés, le premier (Ter 1) est composé de Ciment Type 10, fumée de silice et de laitiers de hauts-fourneaux, le deuxième (Ter 2) contient du ciment Type 10, de la fumée de silice et des cendres volantes. Les proportions exactes de chaque ajouts ne sont pas connues, mais on peut assumer qu'ils sont aux environ de 73% de ciment Portland, 25% de cendres volantes ou de laitiers et 2% de fumée de silice. Les deux autres types de liants utilisés dans le projet sont un ciment Type 10 conventionnel (Type 10) et un ciment Type 10 avec ajout de fumée de silice (8% en masse de liant) (Type 10 SF). Tous les dosages et natures des autres constituants des mélanges (granulats, adjuvants, fibres) sont maintenus constants. Un important effort fut également consacré au maintien des conditions de projection (température, débit, manipulation de la lance, volume produit). L'attention est portée sur plusieurs paramètres que l'on peut classer en deux catégories : propriétés du béton frais et propriétés du béton durci.

3.1 Béton frais

Les plus intéressantes propriétés du béton projeté frais sont la quantité de rebond, la stabilité (l'épaisseur maximale de projection) et le rapport eau/liant. Un critère d'ouvrabilité est utilisé, afin de comparer les différents mélanges projetés. L'ouvrabilité, ou la

consistance, est basée sur les propriétés du béton frais et est déterminée à l'aide d'un essai de pénétration. La mesure est réalisée en enfonçant une aiguille cylindrique (diamètre de 9 mm) dans le béton frais; la consistance correspond à la résistance à la pénétration de l'aiguille. Cette méthode fut utilisée dans le cadre de nombreux projets de recherche précédents : Prudêncio et coll., 1996; Figueiredo et Helene, 1996; Armelin et coll., 1997; Jolin et coll., 2000.

La chambre de projection spécialement aménagée permet d'évaluer la quantité de rebond pendant la projection. L'évaluation du rebond se fait à l'aide d'un système d'acquisition dont le fonctionnement est illustré à la **Figure 1**. Le système d'acquisition permet d'évaluer la quantité de matériaux utilisés, ainsi que l'évolution de la masse de béton qui « colle » dans un moule d'acier vertical. La consistance de projection mesurée à l'aide d'un pénétromètre électronique, la granulométrie du mélange en place, la teneur en eau et la résistance en cisaillement sont évaluées immédiatement après la projection du béton. La proportion des constituants en place et la teneur en eau connues, il est alors possible de déterminer le rapport eau/liant du béton en place. La **Figure 2** présente les résultats de rebond obtenus à différentes consistances pour les différents mélanges testés. La **Figure 2** présente également les valeurs de rapports eau/liant calculées à chaque consistance de projection. Les bétons projetés faits de liants ternaires ont un comportement qui est similaire à celui des bétons projetés conventionnels. C'est-à-dire que le rebond accroît avec l'augmentation de la consistance (projection plus sèche) et le rapport eau/liant varie avec la consistance de projection sur les mêmes proportions que les bétons projetés de ciment Type 10 SF. La proportion du liant qui rebondit est comparable pour tous les mélanges.

La **Figure 3** présente les temps de prises obtenus pour différents types de liants selon que la consistance de projection était humide ou sèche. Les consistances humides ou sèches correspondent à ce que l'on retrouve habituellement en pratique, c'est-à-dire des résistances à la pénétration variant de 1,0 à 1,4 MPa et de 1,8 à 2,3 MPa respectivement. Les temps de prises ont été mesurés selon la méthode de la norme ASTM Standard C 403 « *Time of Setting of Concrete Mixtures by Penetration Resistance* ». Les bétons contenant des cendres volantes (Ter 2) ont des temps de prise initiale et finale légèrement supérieurs aux autres bétons.

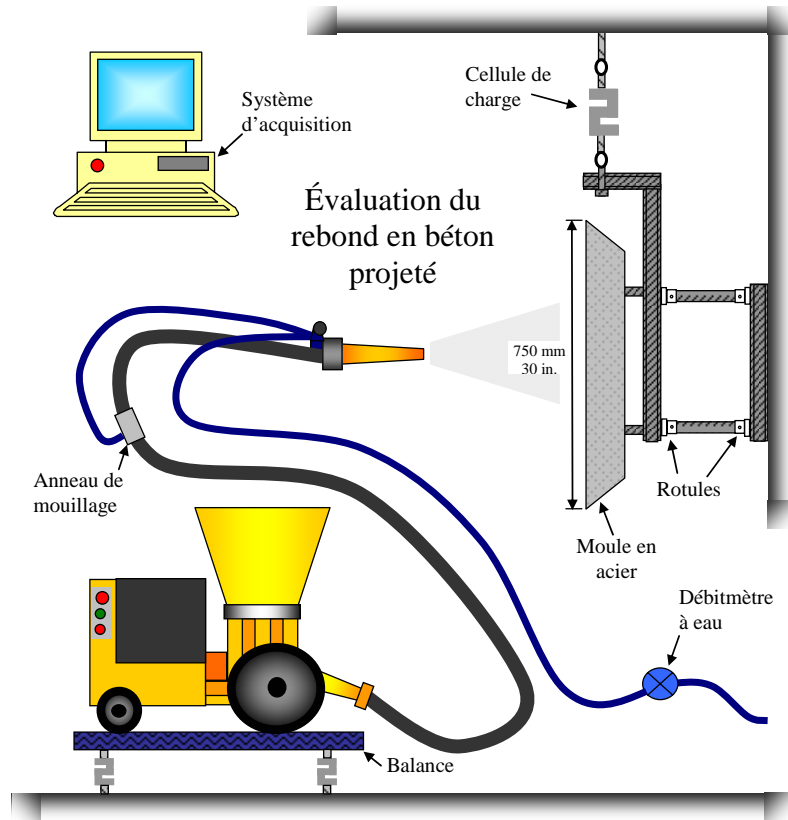


Figure 1 : Schéma du système d'acquisition servant à évaluer la quantité de rebond

La stabilité du béton lors d'une application en surplomb est habituellement caractérisée par une mesure de l'épaisseur maximale de projection à l'aide d'un essai appelé « maximum build-up thickness ». Toutefois, cet essai est peu pratique et il manque de précision. Sachant que la résistance en tension du béton est proportionnelle à la résistance au cisaillement du béton (Jolin, 1999), une méthode basée sur la mesure de la résistance en cisaillement est utilisée, afin de quantifier la stabilité des mélanges de béton projeté. Cette méthode, déjà utilisée dans le cadre de différents projets à l'Université Laval, consiste à appliquer un couple sur une roue à quatre palles plongée dans le béton frais (**Figure 4**). Le couple est appliqué en utilisant un rhéomètre de laboratoire. On obtient la valeur de la résistance au cisaillement en utilisant le couple maximal divisé par la surface cisailée nécessaire pour amorcer le mouvement de la roue à palles dans le béton. Les résultats obtenus pour les bétons projetés à différentes consistances sont présentés à la **Figure 5**.

Évidemment, comme on le voit sur la portion gauche de la **Figure 5**, la consistance de projection a une influence directe sur la contrainte de cisaillement maximale appliquée. Par interpolation, on construit le graphique de la partie droite de la figure, de façon à représenter les résultats pour une même consistance (1,5 MPa dans le cas présent). On savait que la fumée de silice permettait d'augmenter l'épaisseur maximale de projection par

rapport à un béton de ciment Type 10 (Morgan, 1988). Les bétons de liants ternaires sont pas aussi performant que le mélange Type 10 SF, mais beaucoup plus que le Type 10.

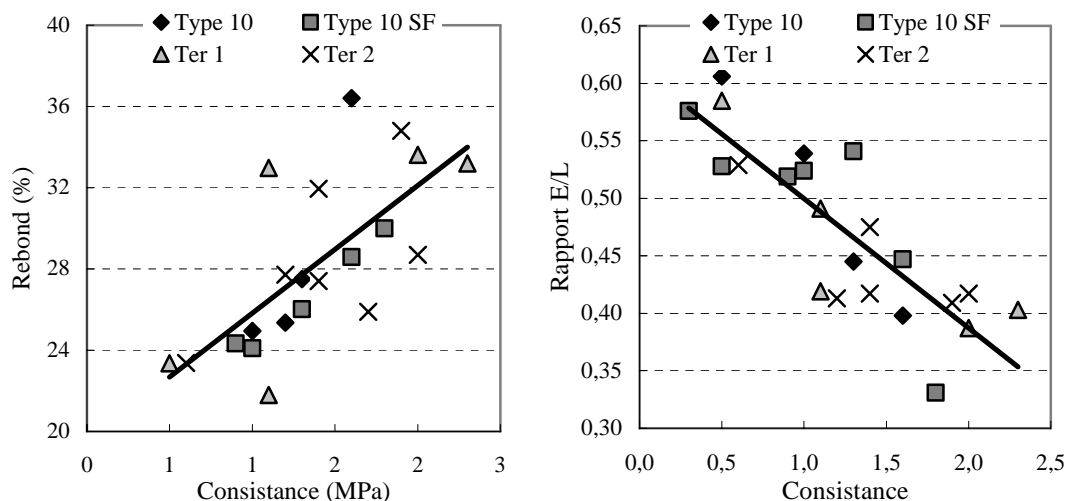


Figure 2 : Valeurs de rebond et de rapport eau/liant obtenus sur plusieurs mélanges de béton projeté par voie sèche et projeté à différentes consistances

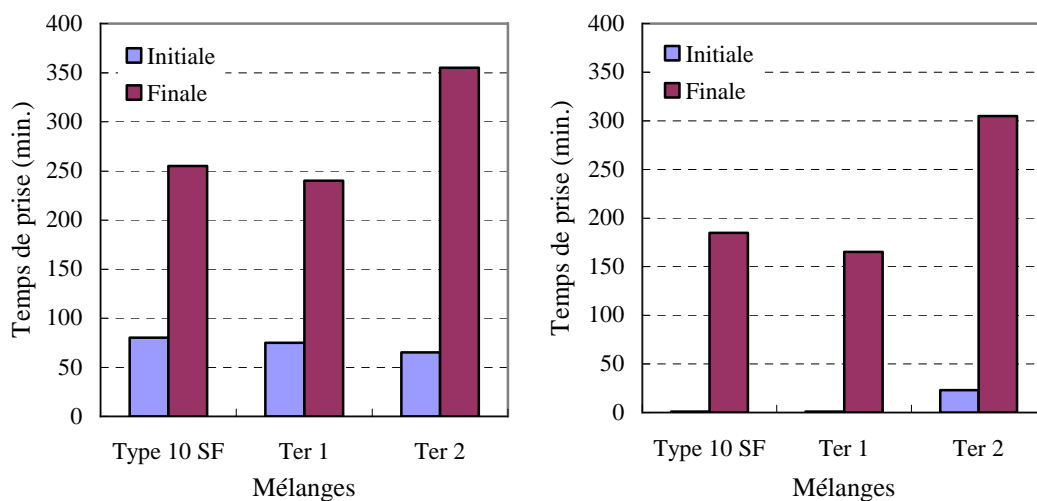


Figure 3 : Résultats d'essai de temps de prise réalisés sur les mélanges de béton projeté par voie sèche (gauche : consistance humide; droite : consistance sèche)

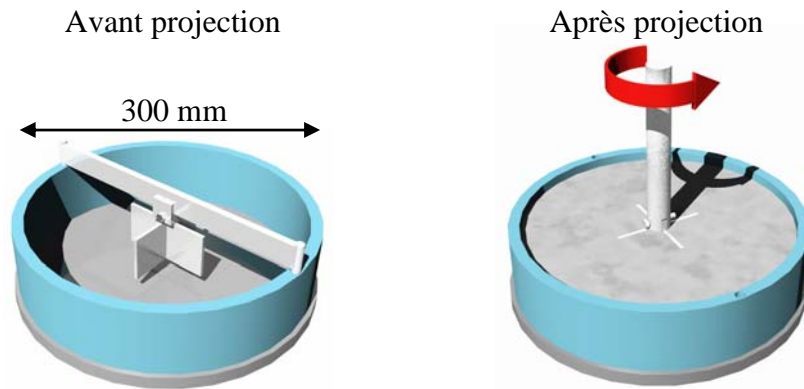


Figure 4 : Essai de résistance au cisaillement

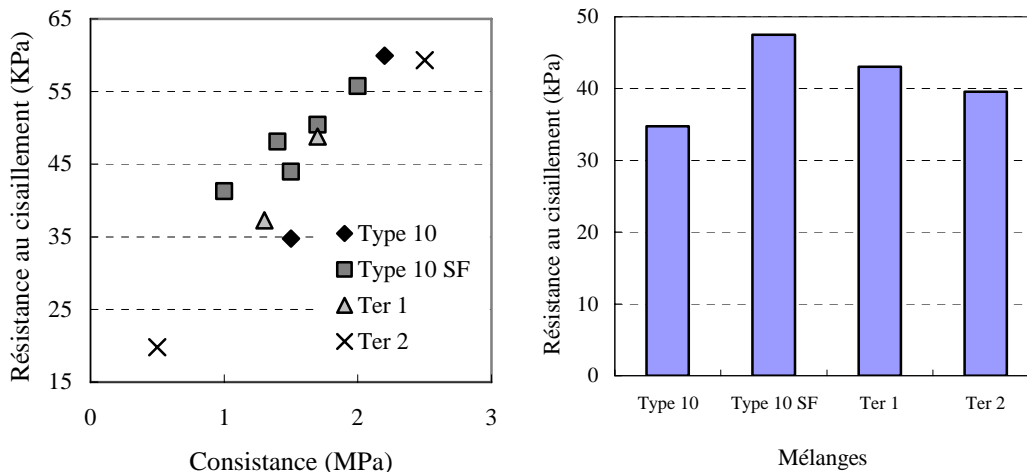


Figure 5 : Résultats de résistance au cisaillement obtenus sur les mélanges de béton projeté par voie sèche (gauche : tous les résultats de résistance au cisaillement; droite : résistance au cisaillement pour une consistance de 1,5 MPa, obtenue par interpolation)

3.2 Béton durci

Plusieurs essais ont été réalisés sur les échantillons de béton projeté durcis dans le but de vérifier leurs propriétés mécaniques et leur durabilité. L'essentiel des propriétés mécaniques évaluées est la résistance en compression à différentes échéances. La **Figure 6** présente les résultats de résistance en compression à différentes échéances pour les deux groupes de consistance; humide et sec. Pour les échantillons de plus d'un jour, ils ont été préparés conformément à la norme ASTM Standard C 42 « *Standard Test Method for Obtaining and Testing Drilled Cores and Sawed Beams of Concrete* ». Évidemment,

comme la consistance influence toute la dynamique de la mise en place et le rapport eau/liant, elle influence énormément la résistance en compression (Jolin et Gagnon, 2004).

Les bétons faits de ternaire avec cendres volantes (Ter 2), ont une résistance en compression qui est inférieure aux autres mélanges, à tous les intervalles de temps. Cependant cette différence est moins marquée à 56 jours. Même si la résistance en compression est inférieure pour le mélange Ter 2, elle atteint quand même plus de 35 MPa à 56 jours.

La mesure des caractéristiques du réseau de bulles d'air, ASTM Standard C 457 « *Standard Test Method for Microscopical Determination of Parameters of the Air-Void System in Hardened Concrete* » a été réalisée sur les échantillons de béton durci. On sait que l'indice L_{barre} est une bonne indication du potentiel de résistance aux cycles de gel-dégel. Les valeurs obtenues sont comparables pour tous les mélanges et consistances de projection. Les résultats sont présentés sur la **Figure 7**. La valeur maximale acceptée par le ministère des Transports du Québec pour le béton projeté par voie sèche est de 320 μm (Norme 3301) et tous les bétons testés répondent à cette exigence. Le facteur de durabilité, ou « Durability Factor », est obtenue selon la méthode de l'ASTM Standard C 666 « *Standard Test Method for Resistance of Concrete to Rapid Freezing and Thawing* ». Les résultats sont excellents dans tous les cas étudiés (**Figure 7**).

La **Figure 8** présente les résultats d'écaillage obtenus selon la norme ASTM Standard C 672 « *Standard test method for Scaling Resistance of Concrete Surfaces Exposed to Deicing Chemical* ». L'essai est plus sévère sur les surfaces finies que sur les surfaces sciées. Le mélange Ter 2, s'est moins bien comporté que les autres mélanges au niveau de l'écaillage. Tous les mélanges respectent les critères de qualité minimale de l'industrie du béton projeté.

Finalement, la **Figure 9** présente des résultats d'essais de corrosion accélérée réalisés sur des barres d'acier d'armature plongées dans différents mélanges de béton projeté. La méthode consiste à créer un circuit électrique, de façon à imposer une différence de potentiel de 5 volts et de prendre des mesures de différence de potentiel aux bornes d'une résistance connue, branchée sur le circuit, à intervalles réguliers. La méthode d'exécution des essais et d'analyse des résultats est disponible dans Gagnon (2004) et Jolin et coll. (2004). Ce que l'on doit retenir, c'est qu'un faible courant constant en début d'essai correspond à la période d'amorçage de la corrosion. Lorsque le courant augmente, cela correspond aux temps d'initiation de la corrosion suivi de la propagation de la corrosion. La partie gauche de la **Figure 9** présente un résultat typique où la période d'initiation de la corrosion est de 28 jours. La partie droite de la même figure présente la moyenne des résultats de temps d'initiation de la corrosion obtenus sur 70 échantillons. Lors de cet essai très sévère, les mélanges ternaires se sont tout aussi bien comportés que les mélanges avec fumée de silice à consistance et épaisseur de recouvrement équivalents.

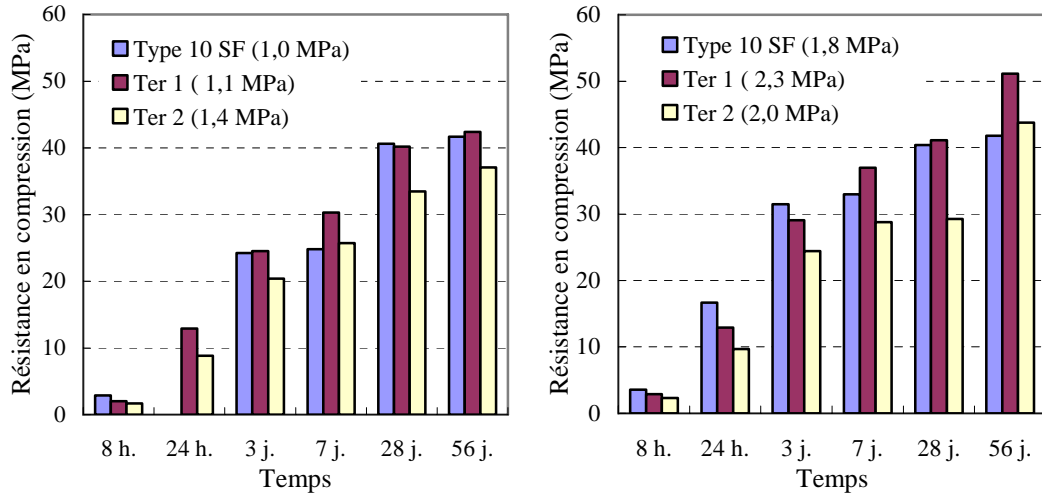


Figure 6 : Résultats de résistance en compression à différents temps de maturité (gauche: consistance humide; droite: consistance sèche)

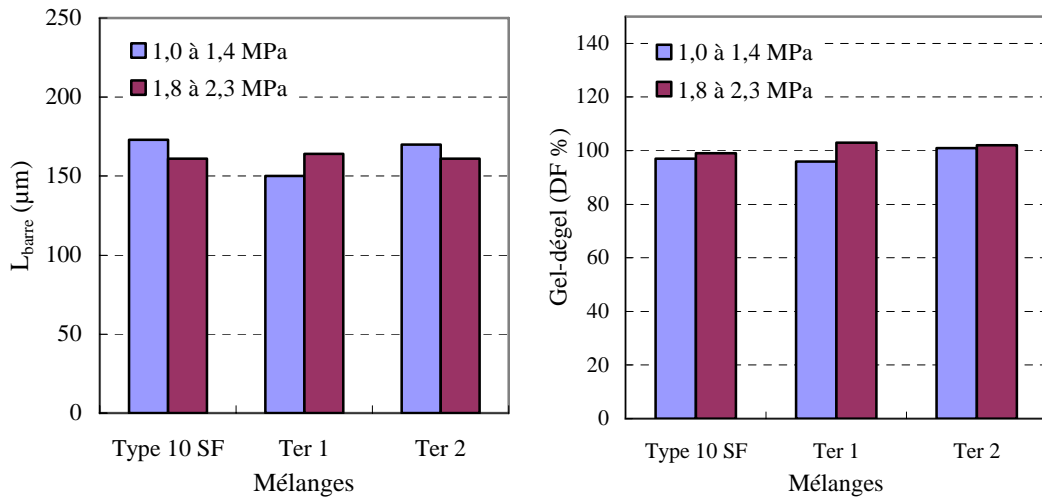


Figure 7 : Résultats de L_{barre} et de gel-dégel

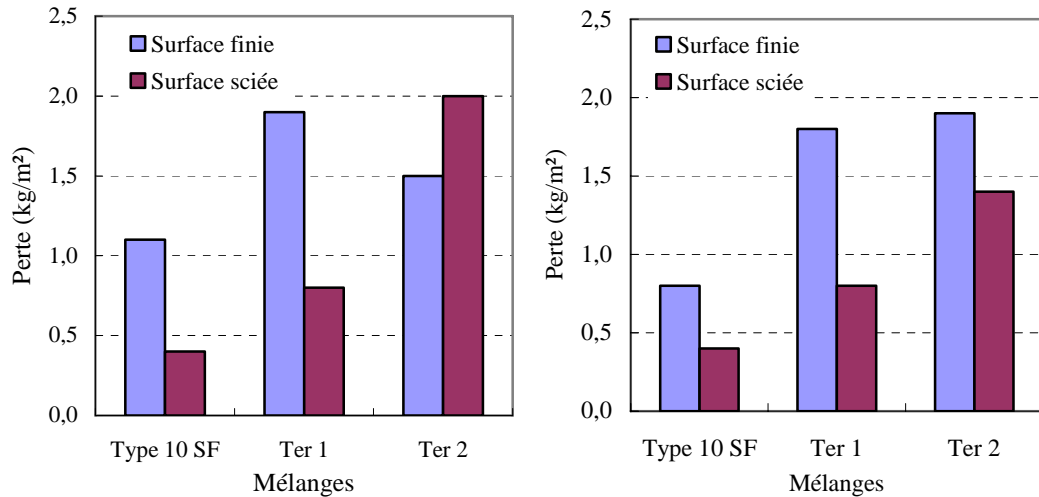


Figure 8 : Résultats d'écaillage (gauche : consistance humide; droite : consistance sèche)

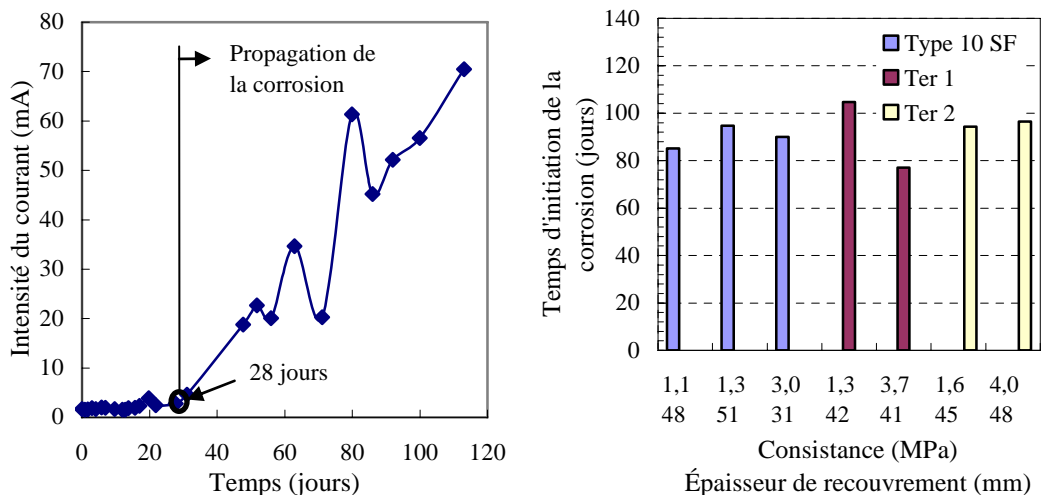


Figure 9 : Résultats d'essais de corrosion accélérée réalisés sur des échantillons de béton projeté par voie sèche (gauche : résultats typiques pour un échantillon avec un temps d'initiation de 28 jours; droite : moyennes des résultats obtenus sur 70 échantillons)

4 Procédé humide

Le béton projeté par voie humide est un béton qui est malaxé de façon conventionnelle. Les premières exigences au niveau du mélange sont à l'effet qu'il soit pompable et qu'ensuite il tienne en place après projection. Finalement, le béton durci doit offrir une résistance en compression suffisante et une durabilité convenable. C'est en 2000 que les bétons projetés par voie humide de ciment ternaire ont été utilisés en chantier pour la première fois au Québec par le ministère des Transports du Québec. Différents travaux de laboratoire ont été réalisés, afin d'évaluer le potentiel d'utilisation de ces liants, ainsi que

d'établir une bonne formulation de mélange. Quelques chantiers ont été réalisés depuis dans la région de Québec par le ministère des Transports du Québec.

La même nomenclature des mélanges que pour la section par voie sèche a été utilisée, soit Ter 1, Ter 2, Type 10 et Type 10 SF.

4.1 Béton frais

La principale particularité que le béton destiné à la projection par voie humide doit posséder, c'est la pompabilité. Chapdelaine (2004), lors de ses travaux de doctorat s'est penché sur la question. Les liants ternaires peuvent contribuer à améliorer la pompabilité du béton par le seul fait de leur densité. Pour évaluer l'aptitude au pompage des différents liants, l'approche habituellement utilisée par les producteurs de béton est de comparer des mélanges de béton qui ont été fabriqués à masse de liant constante et à rapport E/L constant. Étant donné la plus faible densité des liants ternaires, pour un remplacement en masse égale de liant conventionnel (Type 10 SF par exemple), on obtient un plus grand volume de pâte dans le mélange de béton. Le volume de pâte, en augmentant, améliore la pompabilité, quand tout le reste demeure constant (squelette granulaire, rapport E/L,...) (Chapdelaine et Beaupré, 2002).

D'un autre point de vue, un liant de type ternaire peut être utilisé pour diminuer la masse de liant dans un mélange de béton et en conserver la même pompabilité par l'utilisation d'un même volume de liant (et possiblement réduire le prix du béton en fonction du prix du liant ternaire) (Chapdelaine, 2004).

Lors de travaux en chantier, on a remarqué que la projection et la finition de surface sont facilitées par l'utilisation des liants ternaires (Hovington et coll., 2002). Les mélanges de ternaire sont moins « collants » que les mélanges plus courants faits de ciment Type 10 SF. Les ternaires ont également l'avantage de prolonger le temps de maniabilité.

4.2 Béton durci

L'introduction des liants ternaires dans le béton projeté par voie humide était d'abord incitée par l'espoir de réduire le retrait et, par le fait même, la fissuration de surface lors de la réfection d'un ouvrage en béton. Malheureusement, les résultats ne sont pas si convaincants. En effet, la diminution de la fissuration n'est pas aussi évidente qu'espérée. Cependant, même si elle est limitée, la diminution de la fissuration ajoutée à tous les avantages apportés par les liants ternaires sur le béton à l'état frais suffisent à encourager l'utilisation des ternaires en béton projeté par voie humide. Après quelques utilisations en chantier, aucun problème particulier n'a encore été noté quant à l'utilisation des ternaires dans le procédé humide. Les résistances mécaniques, ainsi que la durabilité du matériau respectent les critères d'acceptation (Hovington et coll. 2002).

Souvent, par souci d'esthétique, on utilise un agent retardateur de prise que l'on applique qu'en surface, dans le but de réaliser un béton projeté avec granulats exposés. Cette méthode a été utilisée par le ministère des Transports du Québec dans le cadre de travaux

de chantier en utilisant un béton de ciment ternaire (Hovington et coll. 2002). Les résultats ont démontré que l'adjuvant retardateur de prise se comporte aussi bien avec le ciment ternaire que les ciments plus conventionnels.

5 Conclusion

Les liants ternaires ont sans équivoque un potentiel d'utilisation en béton projeté. Leur aspect vert, ou écologique, est leur premier atout. La résistance mécanique ou la durabilité du béton n'est pas diminué par l'utilisation des liants ternaires. Aucun effet négatif important n'est apporté par l'utilisation des liants ternaires, à l'exception de certaines conditions particulières de chantier. En effet la prise étant un peu plus lente, le temps entre la projection et la finition de surface peut être prolongé de quelques minutes, voir quelques heures. Dépendamment de la situation, cette dernière propriété peut être un désavantage ou un avantage.

Certes il y a encore place à amélioration dans la formulation des mélanges de béton projetés. Cependant, les nouveaux ajouts et adjuvants contribuent à améliorer sans cesse la qualité du matériau en place.

6 Remerciements

Les auteurs tiennent d'abord à remercier M. Alain Hovington du Service des matériaux d'infrastructures du ministère des Transports du Québec pour sa collaboration. Il est important de souligner la participation financière du Conseil de recherches en sciences naturelles et en génie du Canada (CRSNG) par le biais de la Chaire industrielle sur le béton projeté et les réparations en béton. Les membres de cette chaire sont : le ministère des Transports du Québec, la Ville de Québec, la Ville de Montréal, Master Builders Technologies Ltd, King Package Materials and Co., Ciment St-Laurent inc., Lafarge Canada inc, Rhodia, Grace et Hydro-Québec.

7 Références

- Armelin, H., Banthia, N., Morgan, D.R., Steeves, C. (1997) *Rebound in Dry-mix Shotcrete*, ACI Concrete International, vol. 19, no 9, p. 54-60.
- Chapdelaine, F., Beaupré, D. (2002), *Le volume de pâte de liant : une condition nécessaire au pompage du béton*, Progrès dans le domaine du béton 2002, ACI Section du Québec et de l'est de l'Ontario, Ottawa, 3-4 décembre 2002.
- Chapdelaine, F. (2004) *Étude fondamentale et pratique sur le pompage du béton*, thèse de doctorat soutenue en mai 2004 et en attente de dépôt final, Université Laval, Québec, Canada.
- Figueiredo, A.D., Helene, P. (1996) *Evolution of Strength and Toughness in Steel Fiber Reinforced Shotcrete*, Proceedings of ACI/SCA International Conference on Sprayed

Concrete Technology for the 21st Century, held at Edinburgh University, September 10-11, 1996 by the ACI and SCA, edited by S.A. Austin.

- Gagnon, F. (2004) *Enrobage de l'armature dans le béton projeté : évaluations et effets*, Mémoire de maîtrise, Université Laval, Québec, Canada, 178 pages.
- Hovington, A., Saillant, M., Lamontagne, S., Venière, A., Vézina, D. (2002) *Béton projeté par procédé humide. Avancement des travaux de développement*. Bilan 2001-2002, Transports Québec, Laboratoire des chaussées, Secteur béton de ciment, 16 décembre 2002, Québec, 15 pages.
- Jolin, M., Beaupré, D., Pigeon, M. (2000) *Contrôle de la qualité du béton projeté par voie sèche en chantier: innovation récente*, 7e Colloque sur la progression de la recherche québécoise sur les ouvrages d'art, 8 - 9 mai 2000, Québec.
- Jolin, M., Gagnon, F., Beaupré, D. (2004) *Determination of criteria for the acceptance of shotcrete for certification*, Shotcrete : More Engineering Developments, Proceedings of the Second International Conference on Engineering Developments in Shotcrete, 4 October 2004, Cairns, Queensland, Australia, p.175-182.
- Jolin, M., Gagnon, F. (2004) *Effect of fresh shotcrete consistency on material properties and encasement quality*, Soumis à Concrete International.
- Morgan, D.R. (1988) *Dry-Mix Silica Fume Shotcrete in Western Canada*, Concrete International, Vol. 10, No. 1, p. 24-32
- Normes Ouvrages routiers Tome VII, Matériaux*, (2000) Les publications du Québec.
- Prudêncio, L.R., Armelin, H., Helene, P. (1996) *Interaction between Accelerator-admixtures and Portland Cement for Shotcrete*, ACI Materials Journal, vol. 93, no. 6, p. 619-628.