

Le béton projeté: aujourd'hui et demain

Marc Jolin, ing. Ph.D, *FACI*

Département de génie civil et génie des eaux, Université Laval
1065, ave de la médecine, Québec, QC, Canada, G1V0A6
T: 418-656-3163; E: marc.jolin @gci.ulaval.ca

Résumé

Au cours des dernières décennies, le béton projeté s'est distingué parmi les techniques de réparation d'infrastructures par sa durabilité, son attrait économique et sa rapidité d'installation. Le Québec bénéficie aujourd'hui d'une véritable expertise dans ce domaine, expertise reconnue à l'échelle internationale. Cette expertise s'est bâtie entre autres grâce à des programmes de recherche financés en grande partie par les propriétaires d'ouvrages, les acteurs de l'industrie et réalisés dans un laboratoire universitaire unique en son genre. Les connaissances générées à travers les activités de transfert technologique et les suivis d'expérience sur chantier ont permis des avancées majeures tant au niveau du matériau, du procédé de mise en place que de sa robustesse d'utilisation en chantier. Parallèlement à ces avancées, la bonne utilisation et le succès du béton projeté en Amérique du Nord et notamment au Québec sont également le fruit de nombreux efforts mis dans la formation des lanciers.

Dans ce contexte, cet article dresse un portrait de l'utilisation actuelle du béton projeté dans la réfection d'ouvrages au Québec (et ailleurs) et montre comment les différentes avancées réalisées dans le domaine ont aidé les donneurs d'ouvrage à spécifier et encadrer l'utilisation de cette technique toujours d'actualité. Enfin, les efforts actuels qui continuent d'être mis sur le plan universitaire et industriel pour améliorer davantage le matériau, le procédé, les méthodes de cure et relever le défi du développement durable seront également soulignés à travers la présentation de quelques cas récents de réparations en béton projeté.

1. Historique

L'apparition du béton projeté remonte à 1907 aux États-Unis. Son inventeur, Carl Ethan Akeley, était naturaliste et taxidermiste au *Field Museum of Natural History* de Chicago. Alors que le directeur du musée se plaignait de l'apparence de son édifice, Akeley a développé une machine pour recouvrir la façade endommagée avec du plâtre de Paris. Cet appareil, alors appelé le *Plastergun*, consistait à projeter la poudre de plâtre dans une conduite avec de l'air comprimé, et à ajouter la quantité d'eau nécessaire au bout

de la lance. Cette machine, bien que très rudimentaire, constitue la première version du canon à béton projeté. Après y avoir apporté quelques améliorations, Akeley obtint un brevet en 1911 pour son invention: le *Cement Gun*. Peu après, Akeley a cédé les droits de sa machine à une firme d'ingénierie : la *Cement Gun Company* (Teichert 2002). À cette époque, le matériau utilisé était un mortier (appelé *Gunite*), constitué simplement de sable et de ciment.

Les premières utilisations du béton projeté consistaient principalement à recouvrir les charpentes d'acier pour les protéger contre le feu et la corrosion. Dans les années suivantes, le béton projeté est devenu de plus en plus populaire, et ce, dans plusieurs domaines (réparation de bâtiments et de ponts, construction de réservoirs d'eau, de barrages et de tunnels, applications en réfractaire). En 1915, le béton projeté est arrivé en Europe, toujours sous la propriété de la *Cement Gun Company*. Autant le mélange que la machine étaient brevetés. Autrement dit, seul le matériau produit avec un authentique *Cement Gun* pouvait porter le nom de *Gunite*. Entre 1920 et 1940, la *Cement Gun Company* a publié plusieurs documents techniques et résultats de recherches concernant leur produit (Yoggy 2000).

Après la Seconde Guerre mondiale, de nombreux changements ont frappé l'industrie du béton projeté. Premièrement, de nouveaux appareils de projection ont vu le jour, les premiers changements depuis l'apparition du canon original. Ces nouveaux canons ont permis l'introduction de granulats grossiers dans les mélanges; faisant passer le matériau du simple mortier au béton. De plus, le béton projeté par voie humide est arrivé au cours des années 1950. Tous ces changements ont certes fait innover le monde du béton projeté, mais ont aussi amené quelques inconvénients. En effet, le matériau développé la *Cement Gun Company* était bien documenté, et les procédures pour l'appliquer bien définies. L'arrivée des nouvelles technologies a entraîné une dislocation dans l'industrie; chacun faisait comme il voulait. Cet écart a, pendant quelques années, affecté la qualité et la crédibilité du procédé. Il n'existait plus de lignes directrices pour produire du béton projeté de qualité (Yoggy 2001).

Il a fallu attendre les années 1970 pour observer la « renaissance » du béton projeté. L'arrivée de nouveaux équipements dans les années 1960-1970 a permis une plus grande productivité, autant en béton projeté par voie sèche que par voie humide. De plus, la formation du comité 506 par l'*American Concrete Institute* a engendré la publication de plusieurs documents techniques et normatifs. D'importantes avancées technologiques ont aussi contribué à l'avancement du béton projeté dans les années 1970. Il y a eu l'incorporation de fibres d'acier, d'accélérateurs de prise et de fumée de silice aux mélanges (Yoggy 2002).

Au Québec, c'est au milieu des années 1980 que le ministère des Transports s'intéresse davantage à la technique du béton projeté par voie sèche afin de répondre à la quantité grandissante de réparations nécessaires sur sa structure en béton. Bien que les premières tentatives n'ont pas toujours rencontré le succès espéré, des efforts continus et quelques projets de recherche ont permis d'obtenir, au début des années 90, une

composition de mélange de béton projeté par voie sèche et des procédures de préparation de surface avant réparation qui améliorerait grandement la qualité des réparations réalisées¹. Dès lors, le béton projeté est considéré comme une technique à part entière pour la réparation des infrastructures en béton et l'intérêt qu'on y porte dans l'industrie mène à la création d'une *Chaire industrielle CRSNG sur le béton projeté et les réparations en béton* en 1994. Parmi de nombreux partenaires industriels, le ministère des Transports y sera un collaborateur clé pendant plus d'une dizaine d'années. En effet, le cahier des charges et devis sera rapidement mis à jour en fonction des divers résultats de recherche publiée, et de nombreuses plaques d'essais seront mises à la disposition des étudiants chercheurs sur une grande variété de chantiers de réparation. Les recherches ont permis de répondre à de nombreuses questions, entre autres concernant l'influence des accélérateurs de prise (Jolin, Beaupré et al. 1997), l'entraînement de l'air (Dufour 1996) et la résistance au gel, l'influence des ajouts minéraux (Gagnon 2005), la mise en place et le rebond (Jolin 2002, Ginouse and Jolin 2014). Plus récemment, des projets entrepris à l'Université Laval étaient reliés à l'enrobage des barres d'acier d'armature (Basso 2016), et à l'aspect pompage/rhéologie du béton projeté par voie humide (Jolin, Burns et al. 2009).

2. Retombées

Les retombées associées à cet effort de recherche-développement sont nombreuses. D'abord, cela a permis d'importantes améliorations tant au niveau de la conception des mélanges de béton projeté que sur la validation de la compétence des lanciers. D'ailleurs, le programme de certification des lanciers de béton projeté développé en 1996 en collaboration avec le ministère des Transports a joué un rôle important dans la mise en place du programme de certification des lanciers de l'ACI en 2001 (ACI 2015). Du côté des mélanges de béton projeté, l'utilisation de la granulométrie plus grossière et de fumée de silice ou alors le concept de la haute teneur en air initiale sont désormais des concepts bien connus et utilisés partout en Amérique du Nord (ACI 2005).

Ensuite, les diverses activités de transfert technologique et les nombreuses publications ont mené à pas moins d'une centaine d'articles scientifiques et à la création de deux programmes de formation unique. Ainsi, une formation continue les inspecteurs du béton projeté a été offerte quelquefois à la fin des années 90 alors qu'une formation pour les lanciers de béton projeté est offerte (en collaboration avec la Commission de la construction du Québec) depuis près de 20 ans.

Finalement, les suivis et nombreux échantillonnages en chantier ont permis de raffiner les méthodes de contrôle de qualité et ont surtout démontré que les efforts consentis en recherche et développement avait bel et bien permis de grandement améliorer la qualité et la durabilité des réparations en béton projeté fait au Québec.

¹ Il convient de souligner ici les rôles essentiels joués par Messieurs Roger Blanchette et Daniel Vézina, tous deux du ministère des Transports, dans ce qui deviendra un axe de recherche et développement et une expertise québécoise de renommée internationale.

3. Études de cas

L'expertise développée au Québec tant au niveau de l'ingénierie, des constructeurs et de la main-d'œuvre permet aujourd'hui de réaliser des réparations en béton projeté de très haute qualité. À titre d'exemple, de projets récents sont décrits plus en détail dans les sections suivantes.

3.1 - Échangeur Souigny

Dans ce projet réalisé en 2014, cinq (5) structures de l'échangeur Souigny (intersection de l'autoroute 25 et de l'avenue Souigny à Montréal) ont subi des réparations. Au total, ce sont 1 135 m² de surface qui ont été réparés à l'aide de béton projeté par voie sèche sur des épaisseurs variant de 60 mm à 100 mm. Tous les travaux de réfection du béton ont été exécutés selon les exigences de Transport Québec.

| |
|---|
| <p>Concepteur : Aecom Entrepreneur général : Construction Demathieu & Bard (CDB) inc. Surveillant : SNC-Lavalin Sous-traitant projection : Béton projeté MAH Matériaux béton projeté: Matériaux King et cie</p> |
|---|

Les deux premières structures à réparer (AB et AC) consistaient en une dalle évidée. La partie mince de la dalle était très légèrement armée et la qualité du béton ne permettait pas la réparation à l'aide de la technique d'un coffrage de plafond et d'un bétonnage sous pression (figure 1). En effet, tel qu'appréhendé, le béton détérioré cédait lors de la mise en place du béton autoplaçant (sous la pression induite nécessaire afin d'assurer l'adhérence du béton de réparation aux surfaces surplombantes). Il a donc été décidé de bétonner des bandes longitudinales le long des poutres avec un coffrage sous pression et ensuite de projeter du béton par voie sèche sur les parties sensibles de la dalle sur une épaisseur d'environ 100 mm.



[Photos courtoisies de Matériaux King et Compagnie, Construction Demathieu & Bard (CDB) inc. et Béton projeté MAH]

Figure 1: Projection de la dalle évidée (gauche) et de la portion (AH) de l'ouvrage. Notons la finition en arrière-plan à la truelle rotative.

Une autre partie de la structure (AH) présentait un problème de recouvrement de l'acier d'armature depuis la construction en 1960, ce qui a amené l'éclatement du béton sur des épaisseurs d'environ 10 mm et exposait l'armature sur la presque totalité du dessous du tablier. Dans ce cas, le béton projeté a été choisi pour créer une barrière d'épaisseur suffisante pour permettre un recouvrement minimum de l'acier d'armature et en stopper la détérioration. Dans ce cas, la rapidité de mise en œuvre du béton projeté a permis de réparer les 500 m² de façon rapide et efficace. À noter, l'impossibilité de mettre en place une plate-forme de travail (gabarit routier restreint) a forcé l'utilisation de nacelles; un choix pour lequel le béton projeté par voie sèche est particulièrement bien adapté. De même, la grande facilité à mobiliser et démobiliser les équipements de projection par voie sèche a permis d'utiliser au maximum les plages horaires de travail de nuit.

Puisque toutes les surfaces de béton réparé étaient surplombantes, la cure de béton est réalisée à l'aide d'agents de mûrissement. De même, tous les essais de contrôle de qualité menés sur le béton projeté et réalisés de façon journalière par le client ont donné des résultats jugés conformes.

3.2 - Réfection du pont Arthur-Branchaud

Le pont Arthur-Branchaud a été construit en 1963. En 2009-10, des travaux de réfection importants ont été entrepris. Ces travaux comprenaient le remplacement de la travée (dalle de roulement) et des poutres principales. Les travaux englobaient aussi

| |
|--|
| <p><i>Concepteur :</i> Dessau/Cima+ <i>Entrepreneur général :</i> Simard et Beaudry Construction <i>Surveillant :</i> Cima+ <i>Sous-traitant projection :</i> G.T.S. <i>Matériaux béton projeté:</i> Matériaux King et cie</p> |
|--|

une large portion de réfection du béton des colonnes et des chevêtres. Cette réfection du béton a été principalement réalisée à l'aide de béton projeté par voie sèche. Toutes les préparations de surfaces ont été réalisées selon les exigences du CCDG. La démolition complétée, un treillis galvanisé a été installé solidement pour empêcher les vibrations lors de la mise en place du béton projeté. Quelques heures avant la mise en place du béton projeté, le substrat a été arrosé d'eau propre pour bien saturer la surface. Un système de mûrissement humide composé d'un géotextile blanc, d'une toile en polyéthylène et d'un tuyau d'eau perforé a été installé et disposé de manière à être prêt à recouvrir rapidement chacune des zones complétées suite à la finition du béton projeté.

Le type d'équipement utilisé était une machine à béton projeté Aliva 246 équipée d'une lance avec un anneau de mouillage situé à au moins 3 mètres de la fin de la lance. La formulation du béton projeté utilisée était conforme aux exigences du Tome VII des Matériaux de Transport Québec. Il s'agit dans ce cas d'un mélange de béton projeté pré-mélangé en sac à base de ciment GUb-SF, d'air entraîné, de granulats de 10 mm et de microfibrilles synthétiques.

La mise en place du béton projeté a été réalisée par des lanciers certifiés ACI pour l'application de béton projeté par voie sèche sur surfaces verticales ou en sous-face. Bien qu'il y avait de grandes portions à réparer, elles ont été divisées en section d'environ 10 m² pour permettre aux finisseurs d'effectuer leur travail. La finition a été réalisée en 2 étapes: la coupe à l'aide de la truelle d'acier et la finition à la truelle rotative avec disque de caoutchouc densifié pour l'obtention du profil final. Rapidement après la finition des surfaces verticales, les systèmes de mûrissement étaient déroulés pour protéger les surfaces; dès la prise complétée, l'eau est acheminée aux tuyaux perforés afin de maintenir les géotextiles saturés. Ce mûrissement humide est conservé en place pour une période minimale de 7 jours.

Dans ce projet représentant environ 2000 m² de réparation verticale, il aurait été très difficile de fabriquer des coffrages pour chacune nombreuses sections à réparer. L'utilisation du béton projeté a permis de limiter au minimum l'utilisation de coffrage sur les surfaces verticales et donc d'accélérer les travaux et de réduire les coûts totaux. De plus, une portion des travaux a été exécutée sur barge (rivière Richelieu); l'utilisation du béton projeté dans ces cas simplifie grandement la logistique de transport et de mise en place du matériau de réparation. En effet, tous les équipements et matériaux nécessaires sont disposés sur la barge de travail, éliminant ainsi le temps d'attente et permettant de réaliser les travaux de façon rapide et efficace. Dans ce projet, tous s'entendent pour souligner le fait que l'utilisation du béton projeté a permis de grandes économies de temps et d'argent.



[Photos courtoisies de Matériaux King et Compagnie]

Figure 2: Surface préparée avant la projection, notons les éléments de mûrissement (toiles et boyaux) déjà en place afin d'assurer la protection rapide du béton projeté (gauche); projection en cours (droite).

3.3 - Réparation viaduc B approche nord (Aut.15) du Pont Champlain

Les travaux ont consisté à réparer par temps froid l'intrados d'un tablier de pont situé à l'approche nord du Pont Champlain (Autoroute 15) dans la région de Montréal (QC). Les conditions froides (0°C), la présence de vibrations sur le tablier et la plage horaire de

travail restreinte (23h–5h30) étaient les contraintes principales auxquelles l'entrepreneur a dû faire face.

Dans ce contexte, le béton projeté par voie sèche a d'abord été sélectionné comme méthode de réparation de par sa rapidité de mise en œuvre et de mobilisation. Une quantité minimale de coffrage a été

Concepteur et Entrepreneur général:
Groupe Signature sur le Saint Laurent (SSL)
Sous-traitant projection : Cimota
Matériaux béton projeté: Matériaux King et cie

nécessaire pour ajuster le profil de la réparation en surépaisseur (32 m² de surface à réparer sur 125 mm d'épaisseur). L'application du matériau de réparation et la finition de surface ont pu ainsi être réalisées en une seule phase, le décoffrage des surfaces à réparer ayant été supprimé. De plus, la présence de vibrations dues aux passages des véhicules sur le tablier a nécessité la fermeture des voies de circulation situées directement au-dessus de la zone de travaux. Une résistance en compression minimale de 20 MPa devait être atteinte par le matériau de réparation pour permettre la réouverture des voies au trafic. Compte tenu de l'achalandage particulièrement élevé de cet axe routier, une réouverture au trafic la plus rapide possible était souhaitée. Grâce aux dernières avancées dans le domaine (Ginouse and Clements 2015), un mélange de béton projeté par voie sèche à développement des résistances ultra-rapide a été sélectionné pour atteindre les 20 MPa requis le plus rapidement possible.



[Photos courtoisies de Matériaux King et Compagnie et Cimota]

Figure 3: Projection de la surface à réparer (gauche); finition en cours (droite).

En effet, alors que cette résistance est généralement atteinte après 24h à 48h avec les mélanges de béton projeté accélérés conventionnels, le mélange sélectionné a été conçu pour atteindre plus de 20 MPa à 3 heures seulement après son application. Pour pallier aux conditions froides, le substrat de béton a été chauffé au préalable, les sacs contenant le mélange sec de béton projeté et l'eau de gâchage ont quant à eux été entreposés dans un endroit tempéré afin d'assurer le gain en résistance visé. Des panneaux de caractérisation ont été projetés sur le site pour évaluer le développement

des résistances mécaniques du mélange et ainsi déterminer l'heure à laquelle les voies pouvaient être rouvertes au trafic. Le durcissement relativement rapide du matériau (environ 20 minutes) a toutefois compliqué légèrement la tâche de l'entrepreneur durant la finition de surface. Un ajustement de la séquence de projection/finition a permis cependant de réaliser les travaux avec succès. En effet, la circulation a pu être rétablie à 8h00 du matin soit 150 minutes seulement après la fin des travaux.

Dans ce projet, le choix d'utiliser un mélange de béton projeté par voie sèche à gain de résistance ultra-rapide a été déterminant pour garantir une remise en circulation des plus rapides, mais également palier à des conditions de chantier difficiles et une plage horaire de travail très restreinte.

4. Conclusion

La grande expertise développée dans le domaine du béton projeté au Québec depuis un peu plus de 20 ans à tous les niveaux dans l'industrie de la construction sert de modèle en Amérique du Nord. Il importe de poursuivre sur cette lancée et activement développer de nouvelles applications pour le béton projeté. En effet, il est maintenant grandement reconnu que cette méthode de mise en place du béton, surtout dans le domaine des réparations, permet de faire de grandes économies tant par sa rapidité de mise en œuvre que par la simplification du projet de l'absence de coffrages parfois complexe.

Bien qu'il reste encore de nombreuses avenues pour la recherche dans le domaine du béton projeté, c'est aujourd'hui sans contredit une méthode de mise en place mature est bien comprise qui s'inscrit tout à fait par les impératifs de développement durable. La recherche en cours permettra d'améliorer davantage la robustesse des matériaux tout en améliorant la qualité du produit fini. Le nouvel objectif est non seulement d'exploiter au maximum le béton projeté dans le domaine des réparations, mais en plus de recourir à cette méthode de mise en place pour les constructions neuves en béton.

5. Remerciements

L'auteur tient à remercier le Conseil de recherches en sciences naturelles et en génie du Canada (CRSNG) pour leur participation financière par le biais de la *Chaire industrielle sur le béton projeté et les réparations en béton (1994-2004)* et la *Chaire industrielle sur la réparation et l'entretien des infrastructures en béton (2004-2009)*. À travers les années, les partenaires de ces chaires ont été le ministère des Transports du Québec, la Ville de Québec, la Ville de Montréal, Matériaux King et Cie, BASF Construction Systems inc, Ciment St-Laurent Inc., Lafarge Canada Inc., Euclid Canada, Grace Canada, Ambex, Sika Canada et Hydro-Québec.

6. Références

ACI (2005). 506R-05: Guide to Shotcrete. Farmington Hills, Michigan, USA, ACI International: 40.

ACI (2015). CP-60(15): Craftsman Workbook for ACI Certification of Shotcrete Nozzleman Farmington Hills, Michigan, USA.

Basso, P., Jolin, M., Massicotte, B. (2016). Fundamentals of Shotcrete Application and the Bond Strength of Reinforcing Bars. 11th fib International PhD Symposium in Civil Engineering, University of Tokyo, Tokyo, Japan.

Dufour, J.-F. (1996). L'effet des agents entraîneur d'air en poudre sur l'entraînement de l'air et la durabilité du béton projeté par voie sèche. Master thesis, Laval University.

Gagnon, F., Jolin, M., Dorion, P., Beaupré, D. (2005). Potentiel d'utilisation des liants ternaire dans le béton projeté. XIIe Colloque sur la progression de la recherche québécoise sur les ouvrages d'art, Québec, Canada.

Ginouse, N. and W. Clements (2015). "Durability Investigation of Ultra-Rapid Strength Gain Dry-Mix Shotcrete." Shotcrete Magazine **17**(2).

Ginouse, N. and M. Jolin (2014). Characterization of placement phenomenon in wet sprayed concrete. Proceedings of the 7th International Symposium on Sprayed Concrete: Modern Use of Wet Mix Sprayed Concrete for Underground Support, Sandefjord, Norway, 2014.

Jolin, M., D. Beaupré, M. Pigeon and A. Lamontagne (1997). Use of Set Accelerating Admixtures in Dry-Mix Shotcrete. ASCE Journal of Materials in Civil Engineering. **9**: 180-185.

Jolin, M., Beaupré, D., Mindess, S. (2002). Quality Control of Dry-mix Shotcrete during Construction. Concrete International. **24**: 69-74.

Jolin, M., D. Burns and B. Bissonnette (2009). Understanding the pumpability of concrete. Conference on shotcrete for underground support, Davos, Switzerland, March 2009.

Teichert, P. (2002). "Carl Akeley - A tribute to the founder of shotcrete." Shotcrete Magazine **4**(3): 10-12.

Yoggy, G. D. (2000). "The history of shotcrete: Part 1." Shotcrete Magazine **2**(4): 28-29.

Yoggy, G. D. (2001). "The history of shotcrete: Part 2." Shotcrete Magazine **3**(2): 22-23.

Yoggy, G. D. (2002). "History of shotcrete: Part 3." Shotcrete Magazine **4**(1): 20-23.