

17^e édition des Journées scientifiques
du Regroupement francophone pour la recherche et la formation sur le béton
(RF)²B

IFSTTAR, Marne-la-Vallée, France
7 et 8 juillet 2016

DÉVELOPPEMENT DE MÉLANGES DE BÉTON PROJETÉ À VALEURS ENVIRONNEMENTALES AJOUTÉES

A. GAGNON, M. JOLIN, J. DUCHESNE

Centre de Recherche sur les Infrastructures en Béton (CRIB), Université Laval, Québec, Canada

RÉSUMÉ : L'industrie du béton travaille depuis plusieurs années à la réduction de son empreinte environnementale et cette avenue semble également très prometteuse dans le domaine du béton projeté. Étant donné ses proportions élevées, le rebond associé à la projection de béton par voie sèche est une problématique à laquelle il faut répondre. L'objectif de ce projet de recherche est de réduire le gaspillage associé au rebond dans le béton projeté en développant des mélanges à haute efficacité. Des mélanges contenant des ajouts modificateurs de rhéologie ont montré des comportements avantageux en termes de réduction du rebond. Cependant, la teneur en eau élevée de certains mélanges entraînait une réduction de leurs propriétés mécaniques et de leur potentiel de durabilité. Néanmoins, les avantages économiques et environnementaux de ces mélanges sont considérables.

1. INTRODUCTION

L'industrie du ciment et du béton est, depuis plusieurs années, fort active dans le développement de solutions visant à la fois à diminuer son empreinte environnementale et améliorer la durée de vie de ses produits. Que ce soit par des techniques de travail optimisées, par l'utilisation de matériaux à haute performance ou par le remplacement d'ingrédients par des matériaux substitués, les innovations sont évidentes. Dans l'industrie du béton projeté, cette avenue semble également prometteuse, mais seulement très peu d'études ont été réalisées à ce sujet et des changements significatifs n'ont pas encore été adoptés.

Les pertes associées au rebond dans le béton projeté constituent une problématique à ne pas négliger. Le rebond représente des ressources gaspillées qui génèrent des coûts directs de matériaux, des coûts d'élimination et des coûts de nettoyage en plus des externalités environnementales. Variant généralement entre 10 et 50% en fonction de plusieurs paramètres (Armelin et al., 1997), le rebond est une problématique non seulement économique, mais aussi du point de vue des propriétés physiques du béton et de l'empreinte environnementale du procédé. L'amélioration de l'efficacité du béton projeté par la réduction du rebond pourrait répondre à ces problématiques conjointes. Un mélange efficace en béton projeté, c'est effectivement d'arriver aux mêmes résultats en utilisant moins de ressources.

Ce projet de recherche est lié de façon intrinsèque à l'efficacité énergétique et au développement durable, enjeux permanents de l'actualité technologique canadienne, européenne et mondiale. Dans ce contexte, différents mélanges de béton projeté à valeurs environnementales ajoutées ont été développés et étudiés. En effet, des bétons projetés à haute efficacité ont été étudiés à l'état frais et à l'état durci dans le but de réduire le gaspillage associé au rebond.

17^e édition des Journées scientifiques
du Regroupement francophone pour la recherche et la formation sur le béton
(RF)²B

IFSTTAR, Marne-la-Vallée, France
7 et 8 juillet 2016

2. BÉTON PROJETÉ

Bien que le béton projeté soit défini comme une méthode de mise en place (ACI Committee 506, 2005), il est souvent considéré comme étant à la fois un procédé et un matériau. En effet, le procédé de projection du béton est très différent du béton coulé en place traditionnel : les méthodes de construction sont différentes, le comportement du matériau et ses propriétés le sont également.

Il existe deux procédés de projection du béton. Le premier, le procédé de projection pneumatique par voie humide, consiste à pomper du béton humide dans une conduite pour être propulsé au niveau de la lance par l'introduction d'air comprimé. Le béton s'accumule sur la surface réceptrice où il est consolidé par l'énergie des matériaux qui frappe cette surface. Dans le second procédé, celui par voie sèche, les matériaux secs sont acheminés par énergie pneumatique dans une conduite jusqu'à la lance où l'opérateur contrôle la teneur en eau par un anneau de mouillage qui humidifie le mélange. À ce moment, quelques instants avant sa sortie de la lance, le mélange est malaxé par l'énergie pneumatique, puis celui-ci est propulsé vers la surface réceptrice. Ces deux procédés ont certains avantages entre eux et par rapport au béton coulé en place.

Quelques avantages du procédé par voie sèche ont fait en sorte que c'est ce procédé qui avait le plus grand potentiel dans le cadre de cette recherche. Le procédé par voie sèche est très polyvalent en ce sens qu'il est facile d'ajuster la consistance du béton selon la géométrie de l'ouvrage, l'environnement et les caractéristiques physiques recherchées. Il est donc facile d'évaluer son comportement en fonction de différentes consistances, d'où son intérêt dans une telle recherche. Avec cette méthode, il est également possible de réduire les rapports E/L sans causer de problème de maniabilité ou de pompabilité. Le procédé par voie sèche permet aussi d'introduire dans les mélanges des matériaux qui réduisent souvent la maniabilité. Cet avantage est particulièrement utile lorsque l'on veut utiliser des matériaux substitués qui n'ont pas des propriétés optimales dans un mélange de béton traditionnel. Cependant, le procédé de projection par voie sèche engendre généralement une proportion plus importante de rebonds que le procédé par voie humide. En effet, la cohésion dans le mélange est parfois réduite à cause du malaxage insuffisant ou d'une faible teneur en eau, puis la répartition des vitesses dans le jet est moins uniforme (Ginouse et al., 2014). C'est donc dans le procédé par voie sèche qu'il y a le plus de potentiel de réduction du rebond.

3. MÉLANGES À HAUTE EFFICIENCE

Dans l'optique de réduire les pertes associées au rebond, différents mélanges de béton projeté ont été développés, puis leur comportement à l'état frais, leurs propriétés mécaniques et leur porosité ont été étudiés. Ces mélanges contiennent des ajouts qui modifient la rhéologie du béton projeté dans le but de réduire le rebond.

3.1 MATÉRIAUX

Les ajouts testés dans les mélanges sont des produits commerciaux relativement nouveaux dans le domaine du béton projeté. Ils ont été recommandés par nos collaborateurs industriels. Certains de ces produits ont déjà été testés dans des mélanges de béton coulé en place, mais aucune donnée n'a été générée dans le domaine du béton projeté jusqu'à présent.

Le mélange de référence (10FS) est le mélange de base généralement offert par les fournisseurs pour le béton projeté par voie sèche. Le mélange 10FS contient 10% de fumée de silice (FS) en remplacement du ciment et respecte les recommandations du guide *ACI-506 Guide to Shotcrete* quant aux proportions des ingrédients et à la granulométrie des granulats (ACI Committee 506, 2005). La composition du mélange de référence 10FS est présentée au tableau 1 (page suivante).

Le premier ajout testé est l'aluminosilicate de magnésium (ASM), utilisé à un taux de 0,5% de la masse totale sèche du béton en remplacement des granulats fins. C'est une valeur de remplacement recommandée par le fournisseur du produit. Deux mélanges contenant cet agent ont été étudiés : l'un sans fumée de silice (ASM) et l'autre en remplaçant 10% de la masse de ciment par la FS (ASM+10FS). La composition de ces mélanges est présentée au tableau 1. Les particules d'ASM sont en forme de filaments dont la longueur se situe entre 1,5 et 2 μm et dont le diamètre moyen est de 30 nm. Les particules sont chargées positivement à leurs extrémités, puis négativement le long de leur axe. C'est ce qui assure la suspension et la dispersion du ciment dans le béton. Cet ajout est réputé donner un comportement thixotropique à la pâte de ciment (Quanji et al., 2014). Dans le contexte du béton projeté, un comportement thixotropique est idéal : il permet au mélange de s'écouler facilement sous des taux de cisaillement élevés telles ceux rencontrés dans la conduite, mais de rester en place et de s'accumuler facilement sur la surface réceptrice à mesure que la viscosité augmente. Ce n'est pas une prise chimique, mais plutôt une décomposition et une restructuration réversible de la structure du béton frais dans le temps (ACI Committee 238, 2014). Ce comportement engendre normalement une réduction du rebond.

La gomme de diutane (GD), deuxième ajout testé, a été utilisée à un taux de 0,2% de la masse totale sèche du béton en remplacement des granulats fins. C'est également une valeur recommandée par le fournisseur. Deux mélanges contenant cet agent ont été étudiés : l'un sans fumée de silice (GD) et l'autre en remplaçant 10% de la masse de ciment par la FS (GD+10FS). Leur composition est présentée au tableau 1. La gomme de diutane provient d'une fermentation aérobique contrôlée, il s'agit d'un biopolymère. La GD donne à la pâte de ciment un comportement pseudo-plastique d'où son intérêt dans la réduction du rebond en béton projeté (Sonebi, 2006). La pseudo-plasticité est semblable à la thixotropie à l'exception qu'elle ne dépend pas du temps, mais seulement du taux de cisaillement.

Tableau 1. Composition des mélanges

Ingrédients	% total sec				
	10FS	ASM	ASM+10FS	GD	GD+10FS
Ciment GU (\approxCEM I)	18,9	21	18,9	21	18,9
FS	2,1	0	2,1	0	2,1
ASM	0	0,5	0,5	0	0
GD	0	0	0	0,2	0,2
Sable à béton	64	63,5	63,5	63,8	63,8
Pierre 2,5-10 mm	15	15	15	15	15

3.2 MÉTHODOLOGIE

Les mélanges ont été projetés à trois (3) consistances différentes de manière à observer les tendances dans le comportement en fonction de la consistance et de la teneur en eau. Les mélanges ont donc été projetés à une consistance sèche, à une consistance moyenne et à la consistance stable la plus humide (*wettest stable consistency*). De cette manière, il a aussi été possible d'évaluer les limites de ces mélanges.

Des panneaux de projection standard ont été remplis durant la projection, un (1) panneau par consistance (ASTM, 2003). Une fois les éprouvettes carottées dans ces panneaux, les échantillons ont été maintenus dans des conditions de température et d'humidité contrôlées (23°C et HR \geq 95%).

Le calcul de la proportion de rebond d'un mélange de béton projeté a été fait avec un système d'acquisition de données en temps réel. Durant l'essai, le moule de projection était rempli jusqu'à un minimum de 40 kg. Le calcul du taux de rebond (%) se fait selon l'équation 1.

(Éq. 1)

$$\text{Rebond (\%)} = \left[1 - \frac{\text{Gain sur moule de projection (kg/sec)}}{\text{Débit de matériaux secs (kg/sec)} + \text{Débit d'eau (kg/sec)}} \right] \times 100$$

À partir du moule de projection rempli dans l'essai de rebond, une valeur quantitative de la consistance (MPa) du béton projeté a été mesurée à l'aide d'un pénétromètre statique de poche. La moyenne de quinze (15) essais valides est retenue. Cette valeur quantitative de la consistance permet de comparer les mélanges entre eux et selon les tendances obtenues.

Comme la quantité d'eau ajoutée au mélange est ajustée par le lancier, il faut déterminer le rapport E/L du béton projeté à partir de deux essais réalisés sur le même échantillon de béton frais. Un (1) échantillon de matériau a été prélevé sur le moule de projection de l'essai de rebond. La teneur en eau a été mesurée selon l'essai *AASHTO T318-02 Water Content of Freshly Mixed Concrete Using Microwave Oven Drying* (AASHTO, 2011). La teneur en liant a été mesurée selon une version adaptée au béton projeté de l'essai *ASTM-C117 Standard Method for Materials Finer than 75- μ m (No. 200) Sieve in Mineral Aggregates by Washing* (ASTM, 2013).

La résistance en compression du béton projeté a été mesurée selon l'essai *ASTM-C1604 Standard Test Method for Obtaining and Testing Drilled Cores of Shotcrete* (ASTM, 2005). Ces valeurs ont été déterminées aux échéances de 7 et 28 jours pour observer l'évolution de la résistance et obtenir une valeur de comparaison standard. La moyenne des résultats valides obtenus sur trois (3) échantillons est retenue.

Les valeurs d'absorption et de volume des vides perméables ont été mesurées selon l'essai *ASTM-C642 Standard Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete* à 28 jours (ASTM, 2006). La moyenne des résultats valides obtenus sur trois (3) échantillons a été retenue.

3.3 RÉSULTATS

Le graphique présenté à la figure 1A illustre la relation entre le rebond et la consistance du béton pour les cinq (5) mélanges testés. On remarque que les mélanges avec ASM ont réduit le rebond par rapport au mélange de référence. C'est le comportement opposé qui s'est produit pour les mélanges avec GD. La présence de FS n'a pas eu d'effet significatif en combinaison avec l'un ou l'autre des agents. Si l'on compare ces mélanges à une consistance équivalente de 1 MPa, soit une consistance généralement adéquate pour assurer l'homogénéité du béton et un bon enrobage des barres d'armature (Jolin et al., 2002), ces observations sont confirmées (Fig. 1B). Cependant, le mélange avec ASM et 10% de FS a montré des limites de consistance plus étendues.

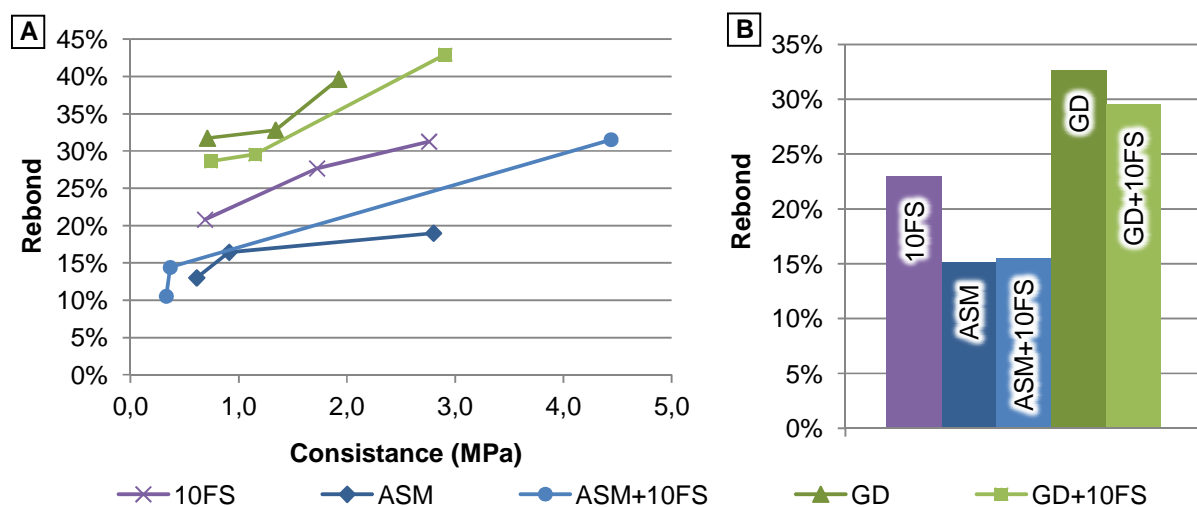


Figure 1. **A)** Rebond en fonction de la consistance **B)** Rebond à une consistance de 1 MPa.

Dans le graphique de la figure 2A sont mis en relation le rebond et le rapport E/L du béton. Cela permet de comparer le rebond des mélanges en considérant un potentiel de résistance mécanique et de durabilité équivalent. Les tendances par rapport au rebond sont similaires à celles observées à la figure 1, par contre on remarque que les mélanges avec ASM ont des rapports E/L généralement plus élevés que ceux des autres mélanges. Également, on peut remarquer qu'à un rapport E/L équivalent de 0,45 (Fig. 2B), les mélanges avec FS ont un rebond plus élevé.

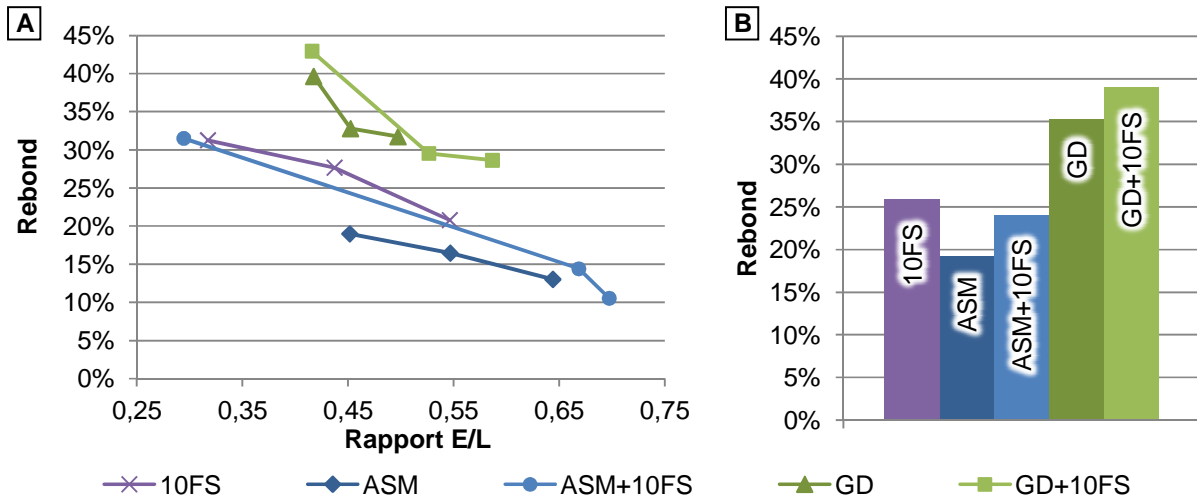


Figure 2. **A)** Rebond en fonction du rapport E/L **B)** Rebond à E/L=0,45.

La figure 3A (page suivante) présente les résistances en compression des mélanges à consistance moyenne en fonction du temps. On peut remarquer que la résistance des mélanges avec GD est assez similaire à celle du mélange de référence. Par contre, la résistance des mélanges avec ASM est significativement inférieure à celle du mélange de référence. La présence de fumée de silice a diminué la résistance des mélanges avec ASM et GD. L'évolution de la résistance en compression dans le temps est semblable d'un mélange à l'autre. Les valeurs de volume des pores perméables sont illustrées dans la figure 3B pour une consistance moyenne. Le volume de ces pores à 28 jours était plus important dans les mélanges avec ASM que dans le mélange de référence. Les mélanges avec GD avaient sensiblement le même volume de pores perméables que le mélange de référence. Les mélanges avec fumée de silice avaient des valeurs plus élevées dans cet essai.

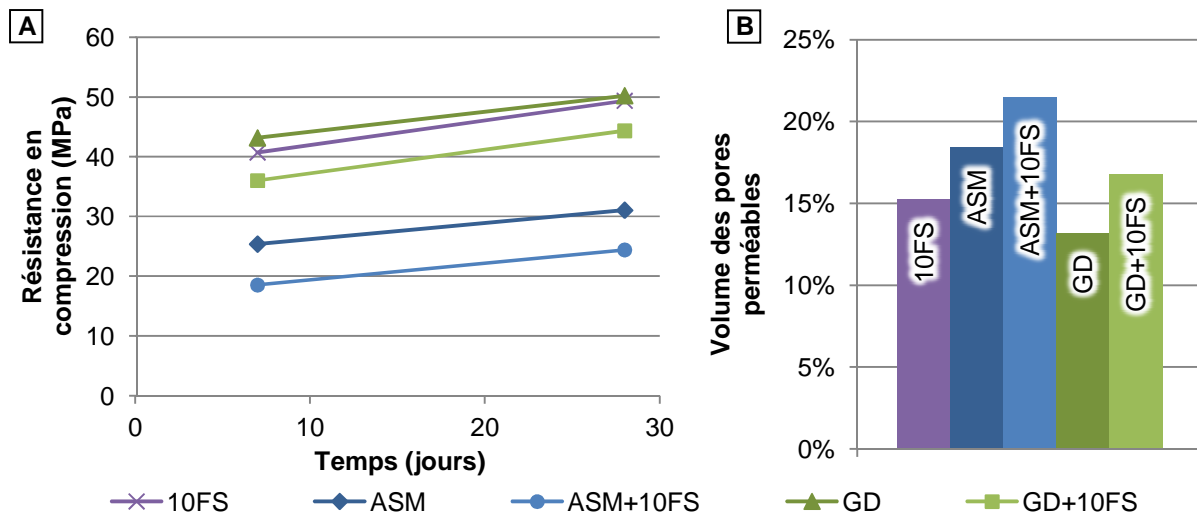


Figure 3. **A)** Résistances en compression à 7 et 28 jours **B)** Volume des pores perméables à une consistance moyenne.

4. DISCUSSION

Tel qu'attendu, l'ASM a effectivement permis de réduire la quantité de rebond. À consistance égale (1 MPa), la réduction est de l'ordre de 8% de rebond par rapport au mélange de référence ce qui donne un rebond de 15%. Le mélange ASM permettait effectivement d'ajouter beaucoup d'eau au béton sans avoir de problème de stabilité sur la surface réceptrice. L'augmentation de la teneur en eau dans le béton projeté engendre une diminution de la consistance et une diminution du rebond. Ce comportement est intéressant, mais l'aspect négatif vient de l'augmentation du rapport eau sur liant (E/L) du béton. En effet, un rapport E/L élevé a le potentiel de réduire la résistance mécanique et la durabilité. C'est ce qui a été observé dans le mélange ASM pour lequel la résistance en compression à 28 jours était de 31 MPa pour une consistance moyenne, une réduction de 37% par rapport au mélange de référence équivalent. La porosité de ce béton, 18% du volume en pores perméables, était également plus grande que celle du mélange de référence à consistance moyenne, soit une augmentation de 3%. La présence de FS dans les mélanges ASM+10FS a peu affecté le rebond du béton, mais a réduit sa résistance mécanique et augmenté sa porosité. Le remplacement du ciment par la FS est peut-être seulement utile au meilleur ajustement de la teneur en eau et à la réduction de poussière pour ce mélange (Wolsiefer et Morgan, 1993).

Contrairement à ce qui était attendu, la GD n'a pas permis de réduire le rebond du béton projeté. À une consistance équivalente (1 MPa), le rebond du mélange GD était de 33%, alors que celui du mélange de référence était de 23%, une augmentation de 10%. Un tel comportement était inattendu et a soulevé plusieurs questionnements face au potentiel de ce produit dans le cadre de cette recherche. Le temps de contact entre l'eau et la GD n'était probablement pas suffisant pour activer cette dernière : le procédé par voie sèche n'est donc pas compatible avec la GD en termes de réduction de rebond. Du point de vue de la résistance en compression, ce mélange se comportait de façon semblable au mélange de référence (± 50 MPa à 28j). La porosité du béton a été quelque peu réduite par la GD : à consistance moyenne le volume des pores perméables a été réduit de 2%. La FS dans le mélange GD+10FS a eu peu d'effets sur le rebond, puis a réduit la résistance mécanique et augmenté la porosité.

Certains aspects du projet ont suscité de l'intérêt et les réflexions qui les ont accompagnées méritent d'être présentées dans les deux prochains paragraphes.

4.1 POTENTIEL ÉCONOMIQUE

Si l'on considère les résultats obtenus avec les différents mélanges à l'étude, on se rend compte que certains d'entre eux ont un potentiel élevé en termes économiques. En effet, diminuer le rebond d'un mélange de béton projeté équivaut à diminuer les besoins en matériaux et en main-d'œuvre, autant lors de l'application que lors du nettoyage si applicable. D'ailleurs, cela revient également à diminuer le coût des externalités environnementales associées à la production du ciment, à l'exploitation des ressources naturelles, et à la pollution de l'air, des sols et des eaux. Par exemple, le mélange avec ASM a permis de réduire le rebond de 8% par rapport au mélange de référence à consistance équivalente. Si l'on considère qu'environ 10M m³ de béton projeté sont utilisés annuellement en Amérique du Nord seulement, diminuer le rebond de 8% équivaudrait à réduire d'environ 800 000 m³ la portion superflue de la consommation de ce matériau. En se concentrant uniquement sur l'économie attribuable au ciment, on parle d'une réduction d'environ 350 000 tonnes de CO₂ par année en Amérique du Nord seulement. Dans un monde où les ressources sont limitées et dans un contexte où le marché du carbone est de plus en plus légitimé, le potentiel de ce type de mélanges est d'autant plus significatif.

4.2 PROBLÉMATIQUE DE CONSISTANCE

Dans l'optique de la réduction du rebond et de l'enrobage adéquat des barres d'armature, le guide *ACI-506 Guide to Shotcrete* recommande, pour le procédé par voie sèche, de projeter le béton à la «*wettest stable consistency*» (ACI Committee 506, 2005). Cette consistance correspond à la teneur en eau maximale à laquelle le béton projeté en place est stable (Studebaker, 1939). C'est-à-dire que la masse de béton plastique a suffisamment de force de cohésion pour résister à l'action de la gravité avant que le ciment ne commence sa prise (Studebaker, 1939).

Comme il a été démontré, le mélange avec ASM a effectivement atteint des consistances et des rebonds très faibles en permettant l'ajout d'une grande quantité d'eau dans le béton projeté. C'est un résultat intéressant, mais l'inconvénient est que le rapport eau sur liant (E/L) augmente à mesure que le lancier ajoute de l'eau au mélange. Par conséquent, il y a un potentiel de réduction de la résistance mécanique et de la durabilité, tel qu'observé, rendant la consigne de la «*wettest stable consistency*» incomplète.

Ainsi, il est maintenant pertinent de se demander de quelle manière l'approche de la consistance en béton projeté par voie sèche peut être améliorée dans le futur. Il s'agit de bien caractériser les mélanges, d'assurer une communication adéquate entre les divers intervenants et de vérifier les propriétés du matériel en place.

5. CONCLUSIONS

Ce projet de recherche a effectivement permis de mieux comprendre le potentiel de l'ASM et de la GD dans des mélanges à haute efficacité en béton projeté par voie sèche. L'efficacité de tels mélanges se traduit par la réduction du rebond, source de gaspillage des ressources en béton projeté. Les mélanges avec ASM ont présenté une réduction significative du rebond, mais leurs propriétés mécaniques faibles et leur porosité élevée semblaient diminuer leur potentiel d'utilisation dans l'industrie. Contrairement à ce qui était attendu, la présence de GD a entraîné une augmentation du rebond, tandis que les propriétés mécaniques et la porosité ont été maintenues à un niveau adéquat. Le comportement peu commun de l'ASM dans le béton projeté remet en question la qualité de la consigne de projection du *Guide to Shotcrete* (ACI Committee 506, 2005) concernant la consistance de projection telle qu'on la connaît actuellement. Néanmoins, le potentiel économique et environnemental de l'ASM est considérable dans une industrie aussi importante que celle du béton projeté. Autrement, une combinaison d'ajouts modificateurs de rhéologie, l'ASM et un superplastifiant par exemple, permettrait peut-être de mieux contrôler le comportement et la teneur en eau du béton projeté. Également, il faudrait éventuellement vérifier si la GD peut être activée d'une autre manière dans le contexte du béton projeté, par la préhumidification par exemple, pour véritablement profiter de son potentiel. Finalement, certains agents ayant déjà confirmé leur potentiel dans le béton coulé en place n'ont encore jamais été testés dans le béton projeté : c'est une avenue prometteuse encore très peu exploitée.

6. REMERCIEMENTS

Les auteurs tiennent à remercier les partenaires suivants : le Conseil de recherches en sciences naturelles et en génie du Canada (CRSNG), le Fonds de recherche québécois Nature et technologies (FRQNT), la Société québécoise de récupération et de recyclage (RECYC-QUÉBEC), la compagnie *King Shotcrete Solutions*, l'*American Shotcrete Association* et la Fondation de la Famille Choquette.

7. RÉFÉRENCES

- AASHTO (2011) AASHTO T 318-02 Standard Method of Test for Water Content of Freshly Mixed Concrete Using Microwave Oven Drying. *AASHTO*: 1-4.
- ACI Committee 238 (2014) Concrete Thixotropy (ACI 238.2T-14). *ACI Technote*: 1-6.
- ACI Committee 506 (2005) Guide to Shotcrete. *ACI Committee Report*: 1-40.
- Armelin, H. S., Banthia, N., Morgan, D. R. et Steeves, C. (1997) Rebound In Dry-Mix Shotcrete. *Concrete International*, 19(9): 54-60.
- ASTM (2003) ASTM C1140-03a Standard Practice for Preparing and Testing Specimens from Shotcrete Test Panels. *ASTM International*: 1-3.
- ASTM (2005) ASTM C1604/C1604M-05 Standard Test Method for Obtaining and Testing Drilled Cores of Shotcrete. *ASTM International*: 1-5.
- ASTM (2006) ASTM C642-06 Standard Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete. *ASTM International*: 1-3.
- ASTM (2013) ASTM C117-13 Standard Test Method for Materials Finer than 75- μm (No. 200) Sieve in Mineral Aggregates by Washing. *ASTM International*: 1-3.
- Ginouse, N., Jolin, M. et Bissonnette, B. (2014) Effect of equipment on spray velocity distribution in shotcrete applications. *Construction and Building Materials*, 70: 362-369.
- Jolin, M., Beaupré, D. et Mindess, S. (2002) Quality Control of Dry-Mix Shotcrete During Construction. *Concrete International* (October): 69-74.
- Quanji, Z., Lomboy, G. R. et Wang, K. (2014) Influence of nano-sized highly purified magnesium aluminosilicate clay on thixotropic behavior of fresh cement pastes. *Construction and Building Materials*, 69: 295-300.
- Sonebi, M. (2006) Rheological properties of grouts with viscosity modifying agents as diutan gum and welan gum incorporating pulverised fly ash. 36: 1609-1618.
- Studebaker, C. H. (1939) Report on Gunite at Arrowrock Dam (pp. 66-66): U.S. Bureau of Reclamation Memorandum.
- Wolsiefer, J. et Morgan, D. R. (1993) Silica Fume in Shotcrete. *Concrete International*, 15(4): 34-39.