

Enrobage de l'armature dans le béton projeté

FRÉDÉRIC GAGNON, MARC JOLIN ET DENIS BEAUPRÉ
Centre de recherche sur les infrastructures en béton, Département de génie civil
Université Laval, Québec
frederic.gagnon@gci.ulaval.ca

Résumé

Depuis la première certification tenue par l'ACI (American Concrete Institute) au printemps 2001, la certification des lanciers de béton projeté gagne continuellement en popularité. La certification des lanciers consiste à s'assurer que les lanciers sont en mesure d'appliquer le béton projeté de façon efficace. Une partie importante de la certification consiste à évaluer l'enrobage des aciers d'armature sur des carottes prélevées d'un panneau de béton projeté. L'enrobage est jugé adéquat ou non par un évaluateur reconnu par l'ACI, selon une évaluation qualitative basée sur des paramètres établis. Toutefois, il existe peu d'information pour déterminer ce qui est acceptable ou non quant à la qualité d'un enrobage. Cet article présente des résultats expérimentaux portant sur l'évaluation des effets des défauts d'enrobage sur la durabilité, et les propriétés structurales d'un ouvrage en béton projeté. Plus particulièrement, l'effet des défauts d'enrobage sur l'initiation de la corrosion des aciers d'armature, et sur les propriétés d'adhérence de l'acier d'armature dans le béton est étudié. La consistance de projection (quantité d'eau ajoutée à la lance), l'épaisseur de recouvrement, les types et genres de défauts créés derrière la barre par une mauvaise projection ont une importance majeure sur les propriétés d'un ouvrage en béton projeté.

1 Introduction

Le contrôle de la qualité est un défi important du génie civil. Un bon contrôle de la qualité permet d'optimiser les performances des matériaux et des techniques de construction et de réparation utilisées. La qualité d'une application de béton projeté dépend autant des constituants et dosages du mélange que de la technique de projection. L'enrobage des aciers d'armature est un paramètre qui a toujours été considéré important, mais aucun résultat expérimental n'était disponible jusqu'à maintenant pour identifier les limites d'acceptation des défauts. C'est-à-dire, quelle est la taille maximale des défauts acceptables qui permet d'obtenir un ouvrage en béton projeté qui est efficace et durable. Le présent article présente le contexte, le programme de recherche, les résultats et l'analyse de travaux expérimentaux portant sur différents aspects de la performance du béton projeté, en fonction du niveau de qualité de l'enrobage des aciers d'armature.

2 Contexte

La certification des lanciers est très populaire afin d'assurer un certain niveau de qualité des travaux de béton projeté. Cette certification consiste à évaluer l'aptitude d'un lancier à enrober adéquatement les barres d'acier d'armature disposées dans un panneau d'essai. Cependant, il y a présentement peu d'information permettant de bien identifier ce qu'est un enrobage adéquat et ce qui n'en est pas un.

L'évaluation de l'enrobage des aciers d'armature dans le béton projeté, en Amérique du Nord et ailleurs, se fait actuellement selon la méthode du « Core Grade » proposée par le comité 506 de l'American Concrete Institute (ACI). Cette méthode est fondée sur une évaluation qualitative de la qualité de l'enrobage et consiste à établir une cote sur une échelle de 1 à 5. La cote 1 étant attribuée à un enrobage parfait, c'est-à-dire qu'un béton de bonne qualité épouse bien la forme de la barre d'acier d'armature sur toute sa surface. La valeur de la cote augmente selon des critères bien établis en fonction de l'importance du défaut.

Les travaux de recherche visaient à évaluer l'impact de la qualité de l'enrobage des aciers d'armature sur les propriétés structurales et de durabilité du matériau. Plus précisément, les paramètres évalués sont les capacités d'ancrage, le comportement en flexion, la résistance au gel-dégel, ainsi que la protection face à la corrosion des aciers d'armature.

De façon générale, en béton projeté par voie sèche, plus la consistance de projection s'approche de la limite d'humidité maximale permettant d'avoir un mélange stable, plus la projection est efficace. Ce concept origine de Studebaker (1939), où il a défini « the wettest consistency » comme étant « the consistency at which the moisture content is the maximum, the maximum being determined by the stability of the fresh gunitite (shotcrete) ». Cette règle de pratique permet de minimiser le rebond, faciliter la finition de surface et finalement d'améliorer l'enrobage des armatures. Powers (1968) a défini la consistance comme étant la résistance à la déformation d'un matériau. On parle alors de consistance sèche ou humide ou de matériau raide ou mou. La consistance de projection affecte également les propriétés du béton durci. C'est la combinaison de deux éléments, consistance humide et haute vélocité à la lance, qui permet d'obtenir un béton projeté de qualité. Un faible rapport eau/ciment jumelé à une faible vélocité produit un béton avec de faibles résistances en compression, dues à la faible compaction du mélange (Zynda 1965).

Les travaux présentés dans cet article font partie d'un vaste programme de recherche dont les objectifs étaient :

- élaborer une méthode d'essai pour évaluer de façon *quantitative* la qualité de l'enrobage des armatures;
- identifier le mélange le plus efficace et les paramètres liés à la technique de projection afin d'assurer un enrobage adéquat des armatures;
- évaluer l'influence de la qualité de l'enrobage des armatures sur le comportement structural;
- évaluer l'influence de la qualité de l'enrobage des armatures sur la durabilité, en particulier sur la corrosion des armatures.

Les résultats du deuxième objectif ont déjà été présentés (Beaupré 2001). Les travaux ont permis de baser sur des résultats scientifiques ce que plusieurs savaient intuitivement, c'est-à-dire que l'expérience du lancier, ainsi que la consistance de projection ont une influence directe sur la qualité de l'enrobage des armatures. Il a été démontré que la qualité du matériau seul ne permet pas d'avoir un bon enrobage des armatures. Il a aussi été démontré que l'expérience du lancier ne suffit pas à garantir un bon enrobage lorsque la consistance de projection est trop sèche. De plus, les travaux ont permis d'identifier deux types de défauts principaux possibles : la présence de vides ou la présence de lentilles de sable (rebond piégé derrière la barre). Le premier type de défauts est habituellement produit par une consistance de projection trop sèche, tandis que le deuxième est associé à une mauvaise technique de projection.

3 Programme de recherche

Comme mentionné précédemment, le programme de recherche visait à évaluer l'aspect structural et l'aspect de durabilité du matériau. Les aspects structuraux sont la résistance à la flexion et à l'arrachement. Les aspects de durabilité sont la résistance au gel-dégel et la résistance à l'initiation de la corrosion des armatures. Le programme de recherche se divise donc en deux parties: structure et durabilité. Cet article ne s'attarde qu'à la résistance à l'initiation de la corrosion et à l'arrachement des aciers d'armature.

Les mélanges utilisés en béton projeté par voie sèche correspondent au mélange usuel utilisé par le MTQ, soit 450 kg/m³ de liant, 1510 kg/m³ de granulats fins, 235 kg/m³ de gros granulats, fibre de polypropylène et agent entraîneur d'air en poudre. Trois types de liant ont été utilisés, soit du ciment type 10 SF (BPS#1), du ciment ternaire avec laitier de haut fourneau (BPS#2) et du ciment ternaire avec cendre volante (BPS#3). Les trois mélanges de béton projeté par voie humide ont également des proportions usuelles, c'est-à-dire 400 kg/m³ de liant, 900 kg/m³ de granulats fins, 700 kg/m³ de gros granulats et agent entraîneur d'air. Les rapports eau/liant étaient de 0,4 (BPH#1), 0,5 (BPH#2) et 0,37 (BPH#3). Le premier mélange de béton ordinaire (BO#1) correspond au mélange BPS#1 malaxé avec un rapport eau/liant de 0,4. Le dernier mélange de béton ordinaire (BO#2) correspond en tout point au mélange BPH#2.

3.1 Arrachement

L'essai de résistance à la force d'ancrage consiste à mesurer la capacité d'ancrage développée sur une barre d'acier d'armature dans un bloc de béton. Dans le cadre de ces travaux, 120 blocs de béton projeté par voie sèche (BPS #1) et 8 blocs de béton projeté par voie humide ont été testés (BPH #3). La figure 1 montre les dimensions et propriétés des échantillons servant à l'essai d'arrachement. Une photo du dispositif servant à l'essai d'arrachement est présent sur la même figure. L'action du vérin hydraulique sur la barre d'acier d'armature ancrée dans le béton projeté produit une force d'arrachement qui permet d'atteindre la limite ultime d'adhérence du lien acier-béton. L'extrémité des échantillons est sciée afin d'abord de contrôler la longueur de la zone d'ancrage et de s'assurer que le béton en bordure de moule n'est pas évalué. Les moules utilisés étant à risque pour l'accumulation de rebond dans les extrémités, il est préférable d'éviter d'étudier ces sections de bloc. Une carotte est également prélevée, afin d'évaluer la qualité d'enrobage de l'échantillon testé. Les essais ont généralement été réalisés après 28 jours de cure humide.

3.2 Corrosion

Divers essais de corrosion accélérés sur des aciers d'armature plongés dans le béton existant déjà, l'essai développé dans le cadre de ces travaux de recherche est une adaptation de ce qui existe déjà aux particularités de la production d'éprouvette en béton projeté. Inspiré par la méthode « lollipop » (Yuan & Chen 1980), plus particulièrement d'un essai de l'Université de Sherbrooke (Lamothe 1991, Petrov 1998), les poutrelles de béton sont disposées de façon à former un bassin d'eau salée. La figure 2 présente un des 16 bassins construits au cours de ces travaux. Une solution à 5% NaCl remplissait le bassin, alors que l'on imposait une différence de potentiel continue de 5 volts entre les barres d'acier d'armature et le grillage métallique fixé sur les faces intérieures des bassins. Les travaux incluaient l'évaluation de béton ordinaire (BO #1 et 2) béton

projeté par voie humide (BPH #1, 2 et 3) et de béton projeté par voie sèche (BPS #1, 2 et 3). Les essais s'étendaient sur une période allant jusqu'à 120 jours dans certains cas, ou jusqu'à une corrosion très importante des aciers. Les bassins étaient construits de sorte que la zone de défaut de certaines poutrelles était directement orientée vers la zone d'eau salée (intérieur du bassin), tandis que les autres poutrelles étaient placées de façon à avoir la zone de défauts sur la face extérieure du bassin. La figure 2 illustre les types d'exposition. Cette configuration de bassin permettait d'évaluer à la fois l'effet des défauts (en condition exposée) et la performance du béton elle-même face à la pénétration des chlorures (en condition non-exposée).

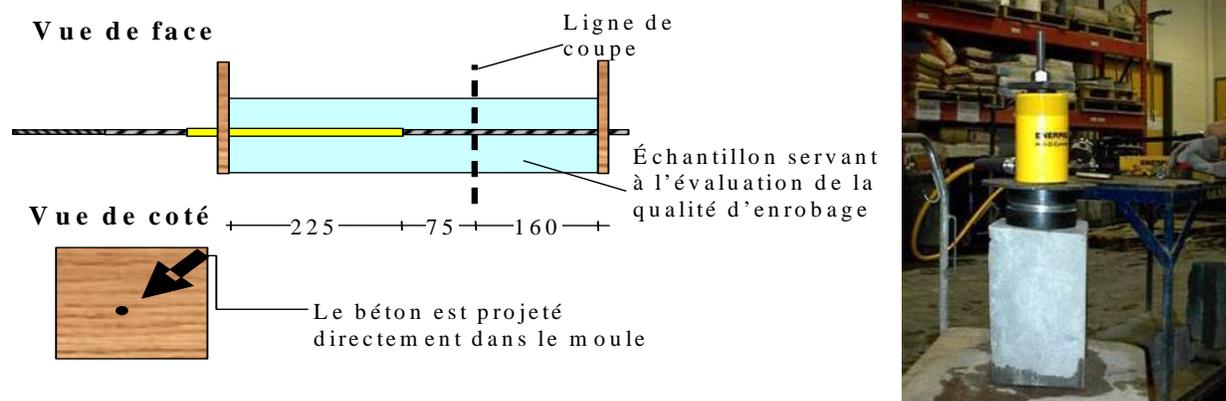


Figure 1. Essai d'arrachement

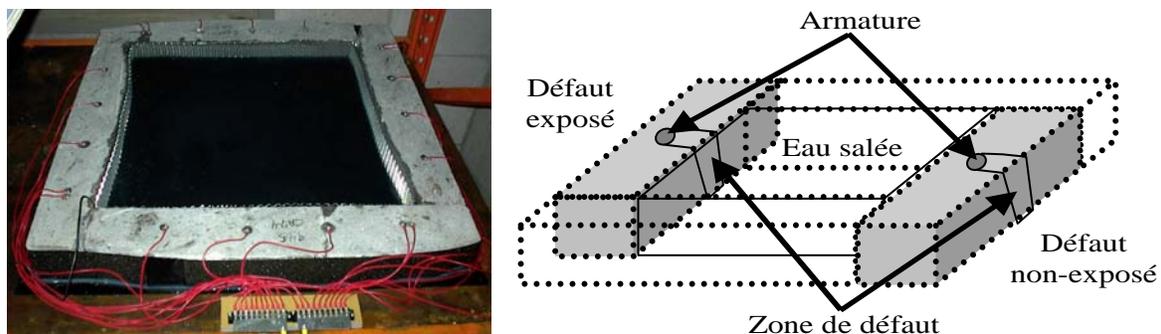


Figure 2. Essai de corrosion accélérée

4 Résultats

4.1 Arrachement

Les premiers essais réalisés portaient sur le béton projeté par voie sèche. En tout, douze projections du même mélange de matériaux secs, mais avec des consistances de projection différentes et par des lanciers d'expériences différentes ont été faites. La variation de la consistance de projection, ainsi que de l'expérience du lancier a permis d'obtenir des bétons de différentes qualités (résistance en compression, compaction du mélange,...) et toute une gamme de qualité d'enrobage.

Pour chaque valeur de force d'arrachement maximale, une valeur de contrainte de cisaillement apparente est calculée. Cette contrainte fictive s'avère être la valeur de la force maximale appliquée divisée par la surface latérale d'acier d'armature en contact avec le béton. La contrainte de cisaillement apparente s'exprime en MPa.

La figure 3 présente la moyenne sur 8 résultats obtenus pour un béton projeté par voie sèche dont la résistance en compression après 28 jours était de 47 MPa. La valeur moyenne de la contrainte en fonction de différentes qualités d'enrobage (« Core grade ») y est présentée. On remarque que la présence de défauts diminue rapidement la capacité d'ancrage des aciers d'armature. Un petit défaut a d'ailleurs plus d'impact qu'une diminution importante de la résistance en compression, tel qu'illustré à la figure 4. Cette dernière présente la moyenne des valeurs (2 à 5 essais) obtenues pour des enrobages parfaits, mais pour des bétons avec différentes résistances en compression.

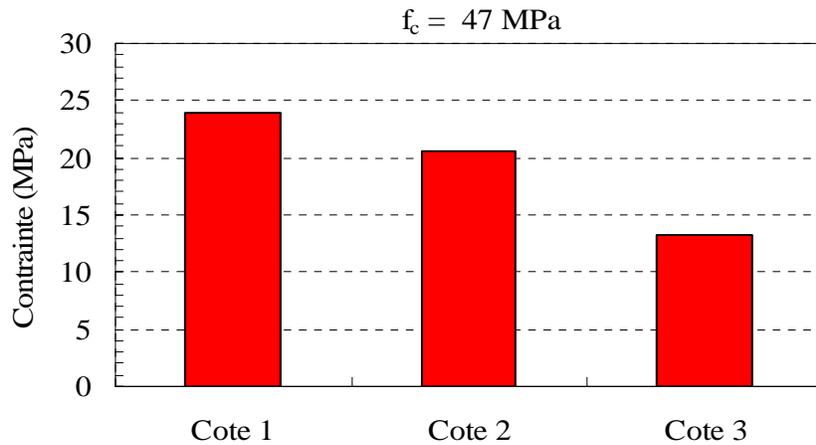


Figure 3. Résultats typiques de résistance à l'arrachement en béton projeté par voie sèche. Contrainte de cisaillement apparente en fonction de la qualité de l'enrobage pour une même résistance en compression à 28 jours..

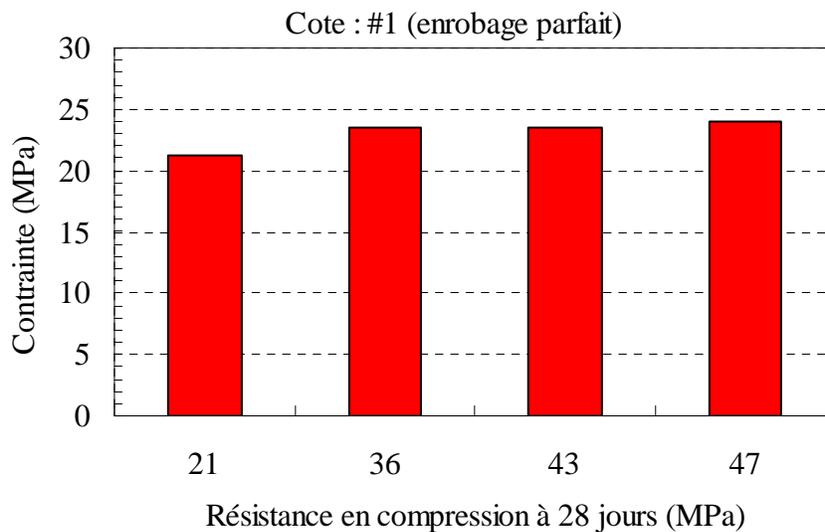


Figure 4. Résultats moyens de contrainte de cisaillement en fonction de la résistance en compression, pour un enrobage des armatures jugé parfait.

Huit échantillons de béton projeté par voie humide ont également été soumis à l'essai d'arrachement. Le but était de comparer la performance du béton projeté par voie sèche avec celle du béton projeté par voie humide. Malheureusement, aucun échantillon de béton projeté par voie humide ne comportait des défauts d'enrobage. Les huit échantillons étaient donc tous très bien enrobés. Les résultats d'arrachement se sont montrés très comparables à ceux avec béton projeté par voie sèche bien enrobés, et cela pour des résistances en compression du béton à 28 jours similaire (figure 5). Des valeurs de résistance à l'arrachement d'essais réalisés sur du béton ordinaire sont ajoutées à titre comparatif sur le graphique de la figure 5. Ces dernières valeurs sont tirées de Sauer (1999).

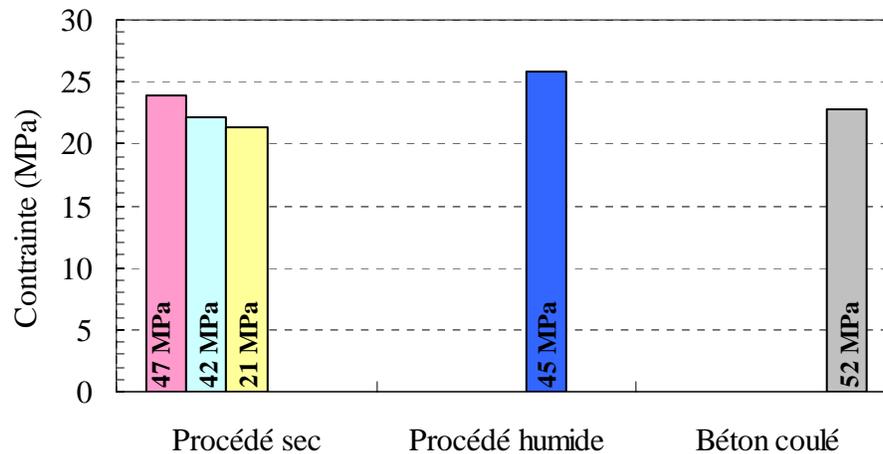


Figure 5. Résultats d'arrachement pour le procédé humide (8 essais) et le béton coulé comparativement aux résultats du procédé par voie sèche (2, 5 et 5 essais). Dans les trois cas les enrobages des aciers sont parfaits.

4.2 Corrosion

Au terme de quatre séries d'essais de corrosion accélérée, il est possible d'établir l'impact de défauts d'enrobage sur la protection contre la corrosion des armatures. De plus, il est possible de comparer les performances relatives de trois mélanges de béton projeté par voie sèche, trois mélanges de béton projeté par voie humide et deux mélanges de béton coulé. Un graphique du courant en fonction du temps est construit pour chacune des armatures étudiées. L'évolution du courant correspond à la vitesse de la corrosion. La figure 6 est un résultat typique obtenu où la période d'initiation de la corrosion est d'environ 95 jours.

La première cobobservation fait référence aux armatures plongées dans le béton projeté par voie sèche en condition non-exposée. La consistance de projection a un impact direct sur la pénétration des chlorures. La figure 7 illustre bien cet observation sur les quatre premiers bétons projetés par voie sèche étudiés. Les temps d'initiation moyens obtenus sur les deux autres types de béton sont également sur la figure. Évidemment, lorsque la consistance de projection augmente, le rapport eau/liant diminue et ainsi le volume des vides perméables diminue. Notons que la valeur de consistance de projection évaluée en MPa, est la valeur mesurée à l'aide d'un pénétromètre (Armelin et coll., 1997; Jolin, 1999 et Jolin et coll., 2000). L'université Laval est équipée d'un pénétromètre électronique. Des résultats typiques de pénétromètre électronique et

leurs interprétations sont présentés dans Jolin et coll. (2000). Le lecteur doit simplement retenir que, après une courte pénétration initiale, le béton frais se déforme et s'écoule autour de l'aiguille sous une pression constante; cette pression est définie comme la consistance. Les échantillons de ce premier groupe de béton projeté par voie sèche avaient une épaisseur de recouvrement d'environ 30 mm. Les essais suivants, avec une épaisseur de recouvrement d'environ 45 mm, ont permis de confirmer qu'une augmentation du recouvrement d'une dizaine de millimètres permettent d'avoir des bétons projetés par voie sèche aussi performants que le béton projeté par voie humide ou le béton ordinaire, et cela peu importe sa consistance.

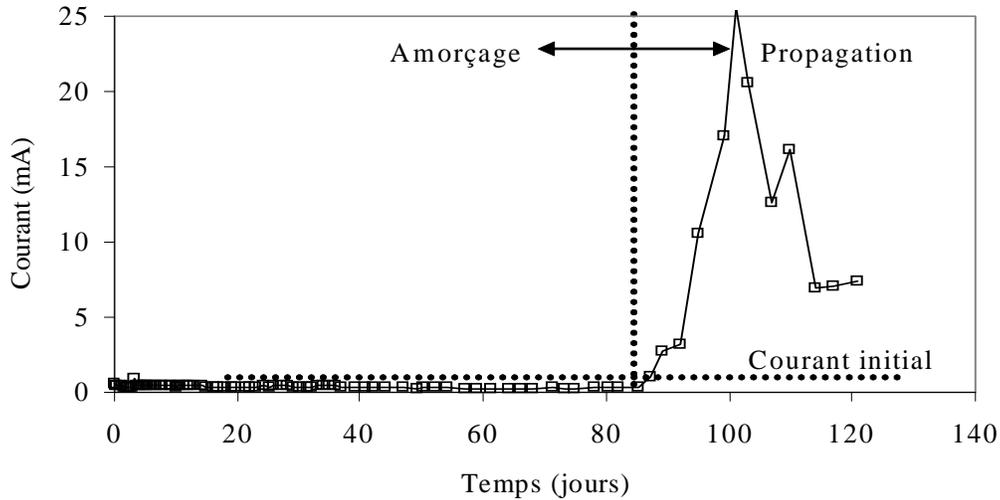


Figure 6. Résultat typique de l'essai de corrosion. Cas d'un temps d'initiation de corrosion d'environ 95 jours.

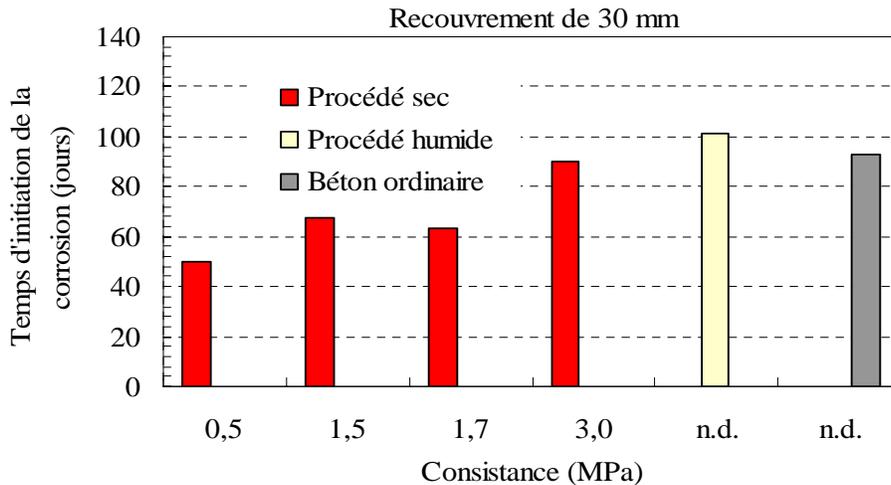


Figure 7. Résultats de corrosion accélérée en condition non-exposée pour des bétons projetés par voie sèche (BPS #1).

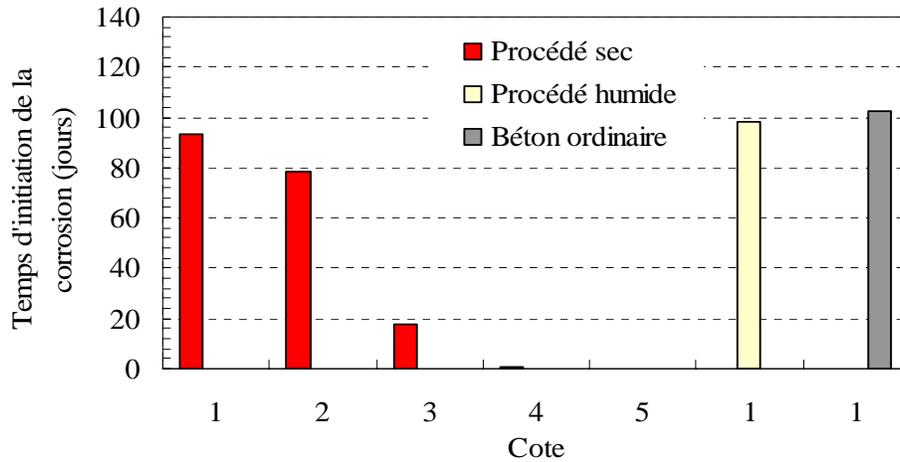


Figure 8. Temps d'initiation moyen de la corrosion en fonction de la qualité d'enrobage (en condition exposée). Défauts causés par des vides.

Comme pour Beaupré et Jolin (2001) lors de précédents travaux de recherche, deux types de défauts d'enrobage furent observés. Le premier, causé par une consistance de projection trop sèche prend la forme d'un vide derrière la barre. Le deuxième, qui est plutôt causé par une mauvaise technique du lancier a l'apparence d'une lentille de sable (matériaux de rebond) derrière la barre d'armature. Dans le cas des défauts causés par un vide derrière la barre (figure 8), la corrosion des armatures pour les enrobages cotés 1 et 2 (réf. « Core Grade »), la protection offerte par le béton est comparable au béton coulé. Dans le cas des cotes 3, 4 et 5 la protection est souvent faible, même nulle. Lorsqu'il y a une lentille de sable derrière la barre (figure 9), les défauts ont moins d'impact sur la protection contre la corrosion. Dans ce cas, les cotes 1, 2 et 3 ont un bon comportement, tandis que les deux autres niveaux de qualité d'enrobage offre une faible protection.

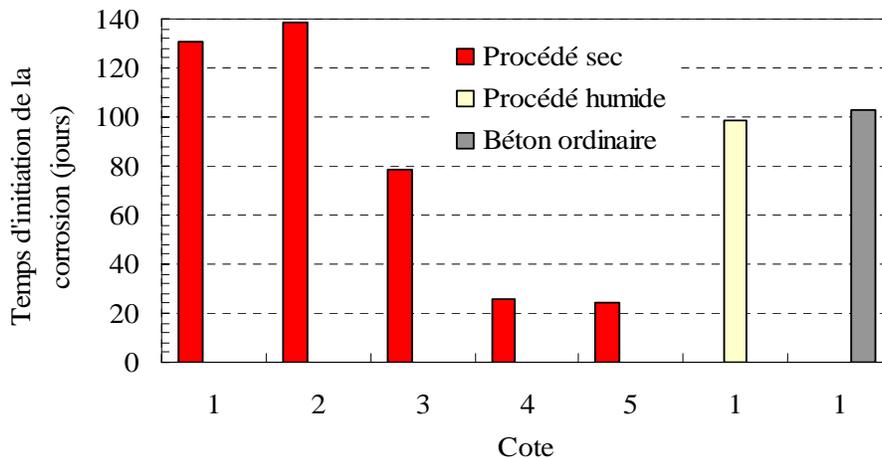


Figure 9. Temps d'initiation moyen de la corrosion en fonction de la qualité d'enrobage (en condition exposée). Défauts causés par des lentilles de sable.

Dans le cas des mélanges de béton projeté par voie humide, comme dans le cas des essais d'arrachement, aucun échantillon n'avait de défauts d'enrobage. Les essais ont été arrêtés après une centaine de jours; période suffisante pour déterminer que le béton projeté par voie humide offrait une aussi bonne protection que le béton coulé.

5 Conclusion

Les conclusions les plus intéressantes de ce grand projet de recherche concernent les résultats d'arrachement et de corrosion. Dans les deux cas, il apparaît que du béton projeté correctement appliqué permet un excellent enrobage des armatures et amène des résultats similaires à ceux obtenus avec du béton coulé en place.

Cependant, lorsque des défauts sont présents (cote supérieure à 2), l'enrobage des armatures n'est pas parfait, particulièrement en termes de corrosion. Il semble que les défauts de type lentilles de sable soient moins dommageables que les vides de même dimension.

Autrement, les résultats supportent le programme de certification de l'ACI C660 qui n'accepte que les cotes #1 et #2 et un nombre limité de #3. À la lumière des résultats de corrosion, il serait intéressant de développer une approche qui permettrait de distinguer les vides des lentilles de sable. En effet, il semble que le type de défaut *et* sa taille soient très importants.

Les défauts d'enrobage des aciers d'armature dans le béton peuvent avoir des impacts importants sur le comportement d'ouvrage en béton. Ces impacts peuvent être aussi bien du point de vue structural que du point de vue de la durabilité. Cependant, on sait maintenant qu'un béton projeté bien appliqué, dont l'enrobage est limité aux cotes 1 et 2, offre des performances aussi élevées qu'un bon béton coulé.

Il est important d'ajouter un commentaire sur les résultats obtenus avec l'essai de résistance à l'initiation de la corrosion. L'essai s'avère être très sévère, plus que les conditions réelle. Il est en effet rare que les défauts d'enrobage soient exposés directement à des agents agressifs comme c'est le cas dans l'essai de laboratoire. Habituellement, le défaut se retrouve derrière la barre; dans le cas d'une réparation, il se retrouve donc entre le vieux béton (substrat) et le nouveau béton. À moins d'un problème d'adhérence, il y a peu de chance que les agents agressifs atteignent la zone de défaut avant qu'ils ne puissent atteindre la barre elle-même.

Il est également important de remarquer que les essais d'arrachement étaient réalisés sur des barres d'armature dont la longueur d'ancrage était de 100 mm, et que lorsqu'il y avait un défaut, celui-ci s'étendait habituellement sur toute la longueur d'ancrage. Évidemment, dans le cas d'un ouvrage en béton projeté, les défauts d'enrobage risquent d'être non continus et dispersés le long de la barre d'armature. Donc, bien que la présence d'un défaut réduise la capacité d'ancrage d'une barre d'acier, cet effet est *local*, et n'est généralement présent que sur des petites sections de la barre.

Pour conclure, les auteurs tiennent à préciser que les résultats présentés ne sont pas directement utilisables pour l'acceptation ou le rejet d'applications sur ouvrages de tailles réelles, puisque les conditions créées dans cette étude ne se retrouveront pas nécessairement à l'échelle de la

structure. L'objectif de l'étude vise à supporter et améliorer les critères des programmes de certifications et de contrôles de la qualité des travaux.

Remerciements

Il est important de souligner la participation financière de l'*American Shotcrete Association* (ASA) et du *Concrete Research Council* de l'ACI (CRC-ACI). Participent également, le 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.

Références

1. **ACI-C660 (2002)** *Certification for Shotcrete Nozzlemen*, Certification Policies, ACI International.
2. **Beaupré, D., Jolin, M. (2001)** *Effect of Shotcrete Consistency and Nozzelman Experience on Reinforcement Encasement Quality*, American Shotcrete Association Magazine, vol. 3, n° 4, p.20-23.
3. **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.
4. **Jolin, M. (1999)** *Mechanism of placement and stability of dry process shotcrete*, Thèse de doctorat, Vancouver (B-C), Canada.
5. **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, Québec.
6. **Lamothe, P. (1991)** *Établissement de critères d'évaluation de structures routières en béton*, Mémoire de maîtrise ès sciences appliquées, Sherbrooke (Québec), Canada.
7. **Petrov, N. (1998)** *Étude des propriétés d'un béton autonivelant in situ et de leurs influences sur l'interface béton-armature*, Mémoire de maîtrise ès sciences appliquées, Sherbrooke (Québec), Canada.
8. **Powers, T.C. (1968)** *The Properties of Fresh Concrete*, John Wiley & Sons inc., New York, 664 p.
9. **Sauer, J. (1999)** *Projet de fin d'études*, Rapport technique, Département de Génie Civil, Université Laval, 77 pages
10. **Studebaker, C.H.,(1939)** *Report on Guniting at Arrowrock Dam*, U.S. Bureau of Reclamation Memorandum, March 10th, 66 p.
11. **Yuan R. L. and Chen W. F. (1980)** *Behavior of sulfur-infiltrated Concrete in Sodium Chloride Solution*, Performance of Concrete in marine Environment, Detroit, USA, ACI, SP-65, p.291-307
12. **Zynda, S.G. (1965)** *Properties of Sand-mix Shotcrete*, ACI, SP-14, San Francisco, p. 155-164.