

# **Enrobage de l'armature dans le béton projeté : Évaluation et effets**

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](mailto:frederic.gagnon@gci.ulaval.ca)

## **Résumé**

Le béton projeté est un matériau efficace et économique pour réparer les infrastructures en béton. La qualité de la mise en place du béton projeté peut parfois varier, surtout pour le procédé sec, et les effets de ces variations ne sont pas bien connus. Dans le but de cerner les paramètres influençant la corrosion des aciers d'armature dans le béton projeté et leurs importances relatives, un essai de corrosion a été effectué. Les essais, présentement en cours, permettent déjà d'affirmer que 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 la propagation de la corrosion des aciers d'armature d'un ouvrage en béton projeté.

## **Introduction**

Le vieillissement des infrastructures au Québec et en Amérique du Nord, jumelé à des diminutions des investissements de la part des gouvernements, ont amené les différents intervenants à développer des méthodes efficaces et économiques pour entretenir et réparer les ouvrages d'art du génie civil. Le béton projeté s'avère être une solution de plus en plus privilégiée pour la réparation des infrastructures en béton. Un des problèmes inhérents à cette méthode d'application pneumatique est l'influence de la qualité de la mise en place. Un des problèmes liés à cette méthode de mise en place est la possibilité d'obtenir un enrobage des aciers d'armature qui ne soit pas parfait. Malgré que la qualité de l'enrobage soit un point critique du contrôle de la qualité lors de réparation en béton projeté, ses effets sur la durabilité et l'efficacité de la réparation ne demeurent que très peu connus.

L'évaluation de l'enrobage des aciers d'armature dans le béton projeté se fait actuellement selon la méthode du « *Core Grading* » 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. Dans le cadre d'un projet de maîtrise, on désire proposer une méthode quantitative d'évaluation de la qualité de l'enrobage des armatures et évaluer les effets de cette qualité sur les propriétés structurales et sur la durabilité de l'application de béton projeté.

## **Durabilité des applications de béton projeté**

La détérioration du béton armé a deux sources principales: les facteurs externes et les phénomènes internes au béton. Les attaques chimiques externes, un facteur important, sont principalement causées par la pénétration d'ions agressifs tels que les chlorures et les sulfates, et de gaz carbonique. Les bétons sont exposés aux ions chlore dans les milieux marin ou par l'utilisation des sels de déglçage. La corrosion des aciers d'armature en présence d'ions chlorure est une des principales causes de détérioration des infrastructures en béton. Évidemment, lorsque

la corrosion des armatures est présente dans un ouvrage en béton armé, le béton se dégrade rapidement. Les produits de corrosion étant plus volumineux que les réactifs, il y aura fissuration, éclatement, délaminage, etc.

Afin de développer une méthode pour faire le lien entre la qualité de l'enrobage d'une barre d'armature dans le béton projeté et la résistance à l'initiation et la propagation de la corrosion, un essai inspiré de l'essai ASTM G 109<sup>1</sup> a été adapté aux conditions particulières de l'étude du béton projeté. Des poutrelles de béton extraites de panneaux de béton projeté sont disposées de façon à former un bassin d'eau salée (Lamothe, 1991; Petrov, 1998). Les Figures 1 et 2 montrent les premiers bassins construits dans le cadre de ce projet. La corrosion est accélérée à l'aide d'un courant électrique continu.

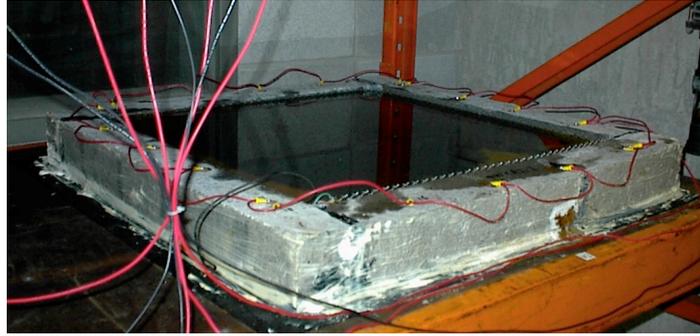
La mesure de la différence de potentiel aux bornes d'une résistance connue permet de caractériser l'activité de corrosion d'une barre d'armature noyée dans le béton. Des mesures quotidiennes permettent ensuite de tracer la courbe d'évolution du courant passant dans la barre d'acier en fonction du temps. Lors des essais, différents diamètres de barres d'armature enrobées selon différentes qualités sont soumises à l'essai sur une période d'environ trois à quatre mois. À la fin des expérimentations, les résultats devront permettre d'établir la relation entre la qualité de l'enrobage de l'armature et la protection contre la corrosion offerte par le béton. Une série faite de poutrelles obtenues d'un béton coulé est aussi prévue afin de situer la qualité de la protection offerte par un béton projeté (par voie sèche et humide) par rapport à un béton conventionnel.



**Figure 1** □ Montage utilisé pour l'évaluation de la résistance à la corrosion

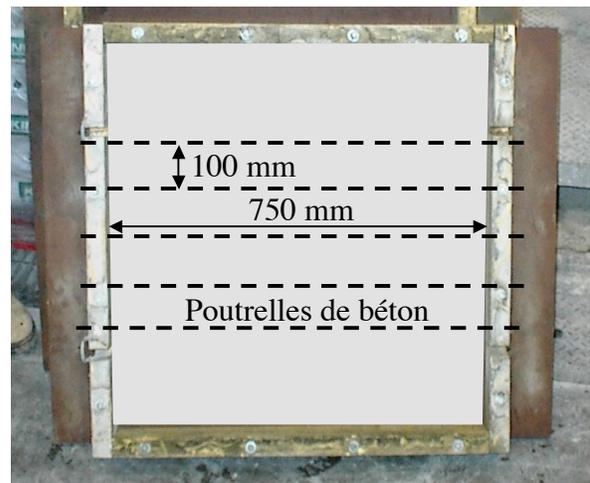
---

<sup>1</sup> ASTM G 109 « Standard Test Method for Determining the Effects of Chemical Admixtures on the Corrosion of Embedded Steel Reinforcement in Concrete Exposed to Chloride Environments ».

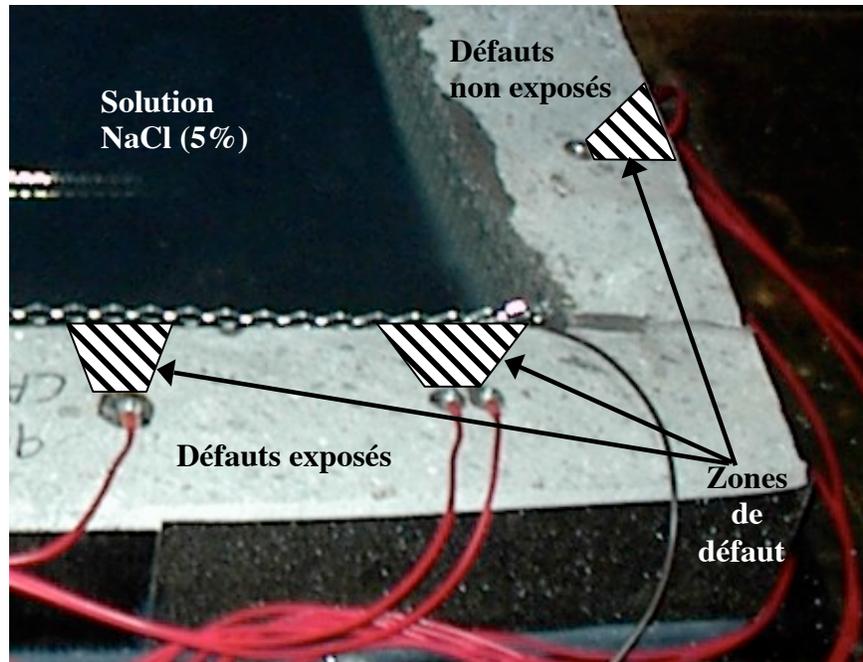


**Figure 2 :** *Vue rapprochée du montage utilisé pour l'évaluation de la résistance à la corrosion*

Chacun des bassins est construit à partir d'un même mélange de base qui est projeté à différente consistance. Dans un panneau type de béton projeté, cinq barres d'armature sont disposées verticalement tel que montré à la Figure 3. Puisque les défauts potentiels d'enrobage des armatures se trouvent *derrière* les barres, les blocs coupés à partir du panneau de béton projeté peuvent être orientés de deux manières. On retrouvera donc deux blocs pour lesquels l'arrière de la barre fait face au bassin d'eau salée (condition *exposée*, E) et deux blocs pour lesquels l'avant de la barre fait face au bassin d'eau salée (condition *non exposée*, NE).



**Figure 3a:** *Panneau type et ligne de coupe pour les blocs formant le bassins*



*Figure 3b: Panneau type et ligne de coupe pour les blocs formant le bassin*

### Première série d'essais

La première série d'essais, débutée à l'été 2002, a été faite de manière à évaluer l'effet de l'importance des défauts et de la consistance de projection sur la corrosion. Pour ce faire, un mélange de béton projeté par voie sèche a été projeté à quatre consistances différentes. Comme on le sait (Jolin et Beaupré, 2001), le changement de la consistance seule mène à des variations de propriétés mécaniques du béton en place. Pour chaque mélange projeté, la consistance de projection, la résistance à la compression à 3, 7 et 28 jours ainsi que l'absorption ont été mesurées. Le Tableau 1 présente les caractéristiques des bétons de la première série d'essais. Pour cette première série d'essais, les défauts obtenus proviennent de la consistance de projection qui est, pour certains panneaux, trop élevée (consistance sèche).

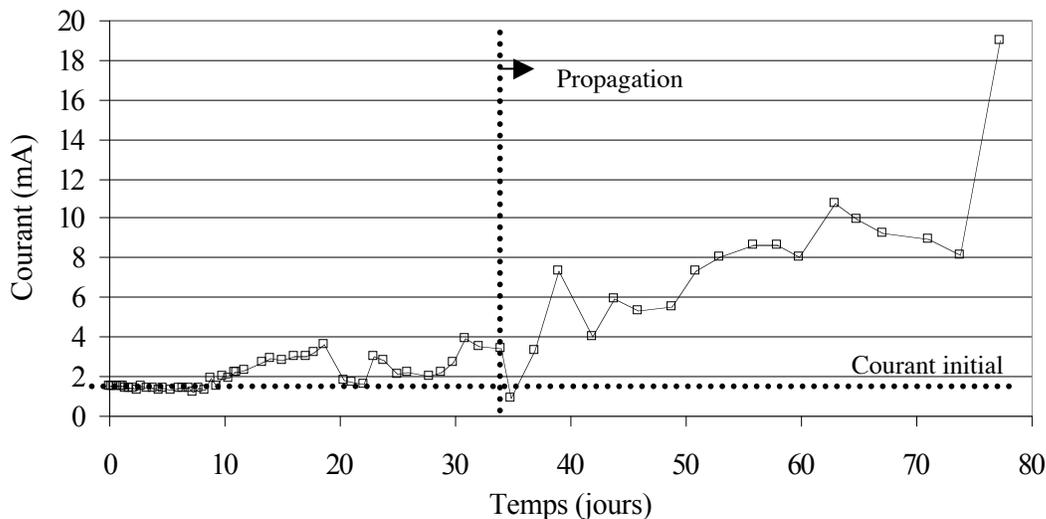
**Tableau 1 : Propriétés des bétons de la première série d'essai**

Consistance (MPa)	Résistance en compression (MPa)			Volume des vides perméables (%)	Absorption (%)
	3 jours	7 jours	28 jours		
0.5	19	24	37	16.8	8.0
1.5	32	31	46	15.1	7.0
1.7	34	34	53	14.9	6.9
3.0	39	45	54	13.6	6.2

Les résultats obtenus sont tels qu'attendus: les consistances de projection élevées (moins d'eau ajoutée à la lance, donc un mélange plus sec) mènent à des résistances en compression plus grandes. De même, l'absorption diminue suite à une augmentation de la densité de la matrice (rapport eau/liant plus faible). Il est important de préciser qu'il existe une valeur de consistance

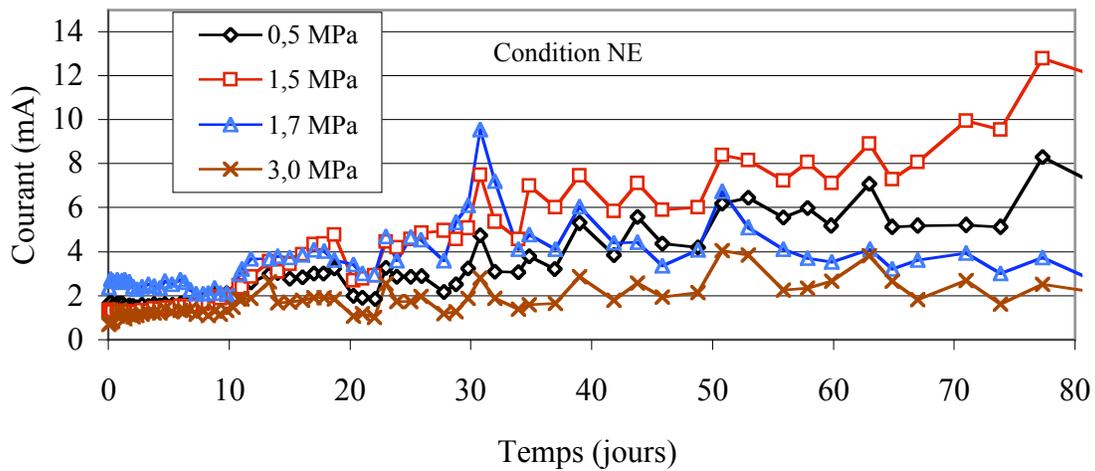
au-delà de laquelle il est difficile de consolider le mélange lors de la projection, ce qui mène à une diminution de la résistance en compression et une augmentation des valeurs d'absorption. Cette valeur limite supérieure n'a pas été atteinte lors de cette première série d'essais.

L'évolution du courant électrique en fonction du temps pour les barres en condition non exposée (eau salé du côté sans défauts) démontre que la capacité du béton projeté à résister à la pénétration des ions chlore selon la consistance de projection augmente avec la consistance de projection. L'épaisseur de recouvrement de béton est d'environ 30 mm pour l'ensemble des échantillons. Ainsi, le béton dont la consistance de projection est de 3,0 MPa est le plus performant. Dans le cas des bétons de 0,5, 1,5 et 1,7 MPa, l'initiation de la corrosion se produit souvent dans les 30 premiers jours suivant le début de l'essai. La Figure 4 montre l'évolution du courant en fonction du temps pour une barre de 15 mm de diamètre noyée dans un béton projeté ayant une consistance de projection de 0,5 MPa et un recouvrement de 31 mm.



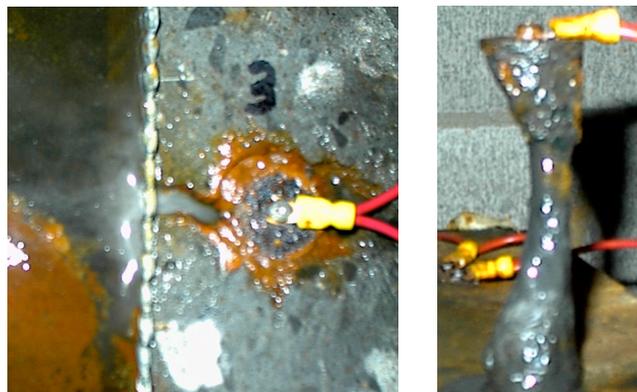
**Figure 4 :** *Activité de corrosion pour une barre 15M avec un recouvrement de béton de 30 mm; condition non-exposée*

Dans le cas du béton ayant une consistance de projection de 3,0 MPa, la corrosion est généralement inexistante, même après 80 jours d'exposition. La Figure 5 illustre la moyenne des mesures de courant pour toutes les barres d'armature selon la consistance de projection du mélange dans lequel elles sont enrobées (condition non exposée). L'utilisation de valeur moyenne illustre bien la performance relative de chaque béton. Les observations faites pour les barres en condition non exposée sont bien en accord avec les propriétés mécaniques présentées au Tableau 1. Ainsi, plus le béton est dense, plus la protection offerte est efficace.



**Figure 5:** Effet de la consistance de projection sur la propagation de la corrosion; condition non exposée et recouvrement moyen de 30 mm.

Le deuxième paramètre évalué lors de cette première série d'essais est l'effet de la qualité de l'enrobage sur l'initiation de la corrosion. Comme on peut le voir à la Figure 6, la condition exposée offre un degré de protection qui est, dans certains cas, très limité! Le Tableau 2 indique le nombre de barres évalué pour chaque consistance et chaque qualité d'enrobage. Tel qu'attendu, les consistances faibles permettent un meilleur enrobage des barres. En fait, seul le mélange projeté avec la consistance la plus humide a permis un enrobage adéquat des barres (ACI-C660).

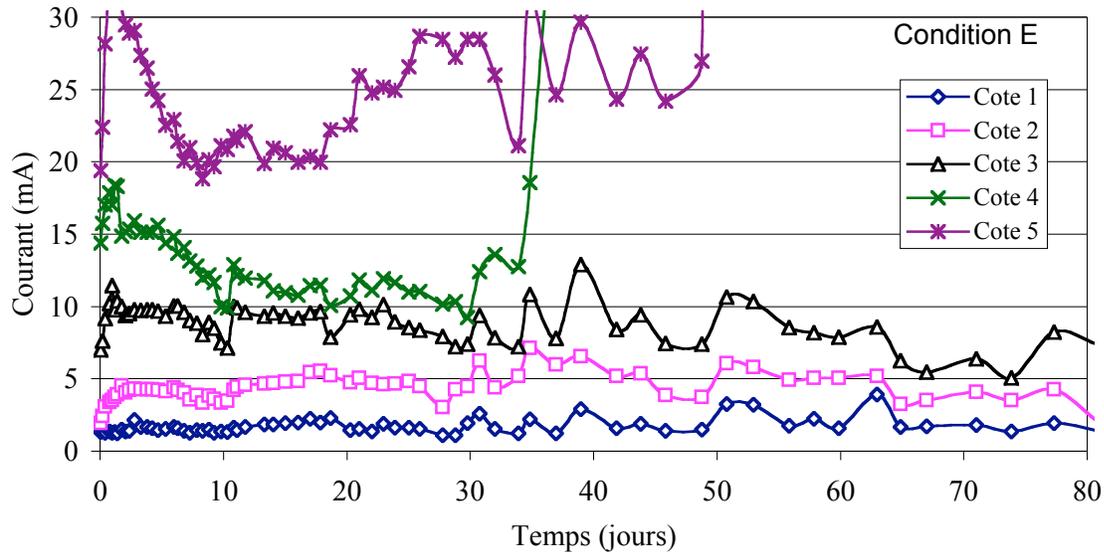


**Figure 6:** Photo de barres corrodées en condition exposée

**Tableau 2 : Répartition des cotes en fonction de la consistance du béton**

Consistances	Qualité de l'enrobage				
	Cote 1	Cote 2	Cote 3	Cote 4	Cote 5
0,5 MPa	8	0	0	0	0
1,5 MPa	1	2	2	2	0
1,7 MPa	0	1	4	1	2
3,0 MPa	0	0	2	1	4

La Figure 7 illustre le comportement moyen de toutes les barres soumises à l'essai de corrosion en condition exposée (E).



**Figure 7 :** Effet de la qualité de l'enrobage sur l'activité électrique; condition E.

La qualité de l'enrobage a définitivement un effet important sur la corrosion. Il est cependant essentiel de noter que les défauts observés pour ces échantillons sont des vides derrière les barres. Les défauts ont été provoqués par la consistance trop sèche du béton et non par une mauvaise technique du lancier.

### **Deuxième série d'essais**

La deuxième série d'essais, débutée à l'automne 2002, évalue la propagation de la corrosion sur trois bétons projetés par voie sèche et sur un béton coulé de rapport eau/liant de 0,40. Le même mélange de matériaux secs que pour la première série d'essais a été utilisé dans tous les cas (projeté et coulé). Pour cette série d'essais, les consistances de projection sont moins variables que pour la première série. Les consistances de projection étant quasi idéales, on crée les défauts dans ce cas par une mauvaise technique de projection. Lorsque la consistance de projection est adéquate, les défauts derrière les barres sont habituellement produits par l'accumulation de rebond derrière les barres (lentilles de sable). De plus, l'épaisseur de recouvrement de béton projeté des barres non exposées (eau salée du côté du défaut) est augmentée à environ 50 mm. Le Tableau 3 présente les résultats préliminaires.

**Tableau 3 : Propriétés des bétons de la deuxième série d'essai**

Consistance (MPa)	Résistance en compression (MPa)			Volumes des vides perméables (%)	Absorption (%)
	3 jours	7 jours	28 jours		
0.8	25	30	43	12.2	5.6
1.1	28	34	44	11.8	5.5
1.3	35	38	49	10.4	4.8
Coulé	35	39	52	6.2	2.8

La deuxième série d'essais est présentement en cours. Les résultats préliminaires indiquent que le passage de l'épaisseur de recouvrement de 30 mm à 50 mm augmente considérablement la protection offerte par le béton projeté. La propagation de la corrosion débute, dans les pires cas, après 80 jours d'exposition, ce qui est près de 3 fois plus tard que pour l'épaisseur de recouvrement de 30 mm. Aussi, les essais semblent montrer que les défauts de types «lentilles de sable» offrent tout de même une certaine protection contre la corrosion.

### **Conclusion**

Les résultats présentés montrent bien l'importance de la qualité de l'enrobage des armatures sur l'initiation et la propagation de la corrosion. L'importance de projeter le béton à une consistance suffisamment humide pour atteindre ce bon enrobage est encore démontrée dans ces travaux expérimentaux. Il semble aussi qu'il y ait une épaisseur de recouvrement minimale à respecter afin d'assurer une protection minimale contre la corrosion.

La durabilité des applications de béton projeté dépend de plus d'un facteur. La consistance de projection, l'épaisseur de recouvrement, les types et genres de défauts créés derrière la barre par une mauvaise projection sont ceux ciblés par ces travaux. Les résultats préliminaires indiquent bien l'influence de ces paramètres sur la propagation de la corrosion. Une troisième série d'essais est prévue pour l'été 2003. Cette troisième et dernière série d'essais vérifiera, entre autres, la performance du béton projeté par voie humide. Les autres objectifs de la troisième série d'essais ne sont pas fixés actuellement, ils dépendent de l'analyse complète de la deuxième série d'essais.

### **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**

- ACI-C660, *Certification for Shotcrete Nozzlemen*, Certification Policies, ACI International, 2002.
- JOLIN, M., BEAUPRÉ, D. (2001) *Influence de la consistance de projection du béton projeté et de l'expérience du lancier sur la qualité de l'enrobage des armatures*, 8<sup>e</sup> Colloque de la recherche québécoise sur les ouvrages d'art, 8-9 mai, Québec, p. 20.1-20.7.
- Lamothe, P. (1991) *Établissement de critères d'évaluation de structures routières en béton*, Mémoire de maîtrise ès sciences appliquées, Sherbrooke (Québec), Canada, septembre 1991.
- 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, septembre 1998, 158 pages.