

# RÉPARATION DU TUNNEL NOTRE-DAME-DE-GRÂCE AU MOYEN DE BÉTON AUTOPLAÇANT

Bernard Pilon, ing., M. Sc.  
*Ministère des Transports du Québec*

## **Résumé:**

Le tunnel Notre-Dame-de-Grâce présentait, près de 40 ans après son ouverture, des signes importants de détérioration à sa voûte intérieure. Causée par l'infiltration de sels de déglçage, la corrosion des aciers d'armature faisait décoller le recouvrement de béton, menaçant ainsi la sécurité des usagers.

Dans le cadre de travaux de réparation majeurs de l'autoroute Décarie, une réparation de l'ensemble de la voûte du tunnel a été entreprise et réalisée au cours de l'été 2003. Les réparations ont été réalisées au moyen de béton autoplaçant. L'emploi de coffrages accrochés à la voûte a permis à l'entrepreneur de couler le béton de nuit tout en n'obstruant pas la circulation routière de jour. L'ensemble des travaux de réparation sur les 230 mètres de longueur du tunnel qui comporte 32 mètres de largeur a été complété en un total de 7 mois. Aucune fermeture de voies de jour dans le tunnel n'a été nécessaire.

## ***Historique et description de la structure***

Débutée en 1965 et achevée en 1967, la construction de l'autoroute Décarie s'inscrivait dans le contexte d'une série de grands travaux visant à moderniser les infrastructures de transport de la région de Montréal. Comportant un total de 21 viaducs sur ses 6,5 km de longueur, l'autoroute a été conçue sous le niveau du sol de façon à se fondre le plus possible dans le tissu urbain de la ville. Parmi ces 21 structures, la plus particulière est sans doute celle qui supporte la cour de l'école Notre-Dame-de-Grâce, la place Grovehill et l'avenue Notre-Dame-de-Grâce. D'une longueur de 228 mètres, elle fut rapidement désignée sous le nom de tunnel Notre-Dame-de-Grâce (NDG).

Conçu à l'origine pour accueillir quotidiennement 90 000 véhicules, le tunnel NDG en accueille maintenant plus de 160 000. Le tunnel est constitué de 19 éléments de béton armé coulés en place selon une pente longitudinale de 3,2 %. Chaque direction de circulation comporte trois voies pour une largeur intérieure totale de 34,7 mètres. La figure suivante présente une coupe du tunnel ainsi que ses principales dimensions.

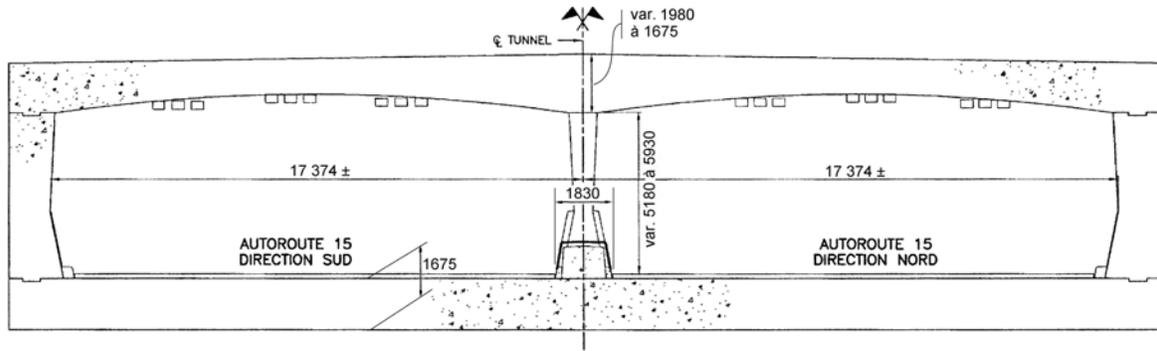


Figure 1 - Coupe type du tunnel

Après près de trente-cinq années de service intense, le tunnel commence à démontrer, à la fin des années '90, des signes de détresse inquiétants à sa partie supérieure. Une inspection démontre alors qu'une portion importante de la surface intérieure de la voûte du tunnel présente un délaminage jusqu'au niveau du premier rang d'armature. Des travaux de réfection complète de la voûte du tunnel sont alors planifiés dans le cadre des travaux de réfection majeurs sur l'autoroute Décarie au début des années 2000.

Dans le but de connaître les causes de la détérioration de la voûte, des carottages ont été effectués. Considérant le volume élevé de circulation et l'absence de système de ventilation à l'intérieur du tunnel, la carbonatation du béton avait été avancée comme explication possible des détériorations. L'analyse du béton des carottes démontra que la carbonatation, quoique présente, n'avait progressé à l'intérieur du béton que sur une profondeur de quelques centimètres tout au plus. La pénétration des ions chlore par contre s'était faite sur une profondeur allant jusqu'à une dizaine de centimètres par endroits. La vaporisation de l'eau salée lors du passage des véhicules et l'absorption dans le béton par succion capillaire sont vraisemblablement à l'origine de ces résultats.

### ***Objectifs des travaux de réparation***

Une fois la cause des détériorations identifiée, la préparation et la conception des travaux de réfection ont pu être entreprises. C'est ce mandat qui a été confié au printemps de 2002 par la Direction de L'Île-de-Montréal au Service de l'entretien de la Direction des structures.

Plusieurs contraintes rendaient difficile la planification des réparations. Parmi celles-ci, mentionnons l'épaisseur de la voûte du tunnel (1,26 m de béton) qui rendait impossible une intervention par le haut et l'utilisation du terrain à la surface du tunnel (rues, école, résidences) signifiait que les réparations devaient s'effectuer alors que la structure continuait à supporter des charges.

La plus grosse contrainte était cependant l'important volume de trafic routier devant être maintenu lors des périodes de pointe, périodes qui s'étirent sur presque toute la durée du jour sur l'autoroute Décarie. Bien que des fermetures de nuit du tunnel étaient envisageables, aucune entrave à la circulation de jour n'était tolérée. Cette dernière exigence limitait non seulement le temps de travail de l'entrepreneur dans le tunnel mais rendait également impossible l'utilisation d'étais afin de supporter la voûte partiellement démolie.

Suite à l'analyse de ces nombreuses contraintes et des particularités de la réparation, deux options ont été retenues : l'utilisation de béton projeté et l'utilisation de béton autoplaçant. Étant donné la quantité importante de réparations à effectuer au cours des travaux de réfection, des planches d'essai visant à tester et perfectionner les méthodes de réparation ont été planifiées à l'automne de 2002.

### ***Planches d'essai***

En marge des travaux de rénovation d'autres structures de l'autoroute Décarie, trois planches d'essai sur la voûte du tunnel sont réalisées à l'automne 2002 afin de mettre à l'épreuve des techniques potentielles de démolition et de réparation. Chacune des planches mesure 6 mètres dans le sens longitudinal et 3 mètres dans le sens transversal.

Une première planche met à l'essai une réparation sans surépaisseur au moyen de béton projeté par voie sèche et les deux autres planches, une réparation sans surépaisseur au moyen de béton autoplaçant. Dans la première des deux planches utilisant le béton autoplaçant, ce dernier est pompé dans le coffrage à partir du point haut tandis que dans la seconde, le béton est pompé et introduit dans le coffrage à partir du point bas. Le mélange de béton autoplaçant utilisé est à base de ciment ternaire et correspond aux exigences du ministère en termes de maniabilité.

La réalisation des planches d'essai a permis de faire plusieurs constatations qui ont substantiellement modifié la planification des travaux. La plus importante de ces constatations est la difficulté avec laquelle se déroule la démolition. L'espacement serré de l'armature dans la voûte (barres n° 35 espacées à 150 mm) de même que la position des employés affectés à la démolition ralentit énormément les cadences de travail. La démolition de la surface de chaque planche d'essai (18 m<sup>2</sup>) jusqu'à une profondeur de 25 mm derrière les rangs d'armature nécessitait environ une douzaine d'heures de travail. Il est donc clair qu'une solution plus efficace allait devoir être retenue pour la réalisation des quelques 7 920 mètres carrés de surface de la voûte.

Une fois la démolition complétée sur chaque planche, la mise en place du béton avec les trois méthodes choisies est effectuée. Dans tous les cas, la mise en place s'est déroulée sans rencontrer de problèmes majeurs. Les deux planches de réparation avec béton autoplaçant ont permis d'obtenir une surface finie de qualité généralement acceptable bien que quelques vides de remplissage aient été constatés pour le béton autoplaçant introduit à partir du point haut des coffrages. Lors de la finition de la planche réparée au moyen de béton projeté par contre, quelques cratères de 15 à 20 cm de diamètre se sont formés.

Suite à la cure des réparations, des carottages sont effectués afin de constater leur efficacité. Les carottes forées dans les réparations de béton autoplaçant présentent généralement une excellente consolidation du béton autour des barres d'armature et une bonne liaison entre le béton de réparation et le substrat. Il en est par contre tout autrement dans le cas des carottes prélevées dans la réparation de béton projeté. La plupart de ces carottes montrent des vides importants derrière les barres d'armature ainsi qu'une très faible adhérence entre le béton d'origine et le béton de réparation.

Il est assez simple d'expliquer la présence des vides derrière les armatures dans les réparations avec béton projeté; la présence de grosses barres d'armature relativement rapprochées rend la tâche du lancier très difficile lorsque vient le moment d'enrober ces armatures. Suite aux difficultés rencontrées avec le béton projeté sur la planche d'essai, la méthode de réparation avec béton autoplaçant a été sélectionnée et exigée au devis en vue des travaux de réfection de la voûte.

### ***Description des travaux***

Suite aux constatations faites lors de la réalisation des planches d'essai, une nouvelle façon de procéder aux réparations est planifiée. Au départ, il était prévu de réparer la totalité de la voûte du tunnel sans surépaisseur. Or, ce type de réparation requiert la démolition du béton jusqu'à l'arrière des armatures existantes, démolition qui est très exigeante. Afin de limiter cette démolition, la majorité des surfaces du tunnel allaient devoir être réparées sans dégager les armatures existantes, donc au moyen d'une réparation en surépaisseur.

La réparation en surépaisseur possède le grand avantage de ne pas obliger le dégagement des armatures existantes. Dans le cas des travaux réalisés au tunnel, cette façon de réparer possède le désavantage de ne pas retirer en totalité le béton existant contaminé aux chlorures. La surépaisseur de béton contient par contre un lit d'armatures additionnelles ce qui permet de confiner efficacement le béton existant de moins bonne qualité. De plus, une excellente liaison avec le substrat de béton existant est assurée par la présence de nombreux ancrages.

Plusieurs caractéristiques visent à garantir une bonne durabilité des réparations. Ainsi, tout le béton employé pour celles-ci est à base de ciment ternaire. Les armatures ajoutées aux réparations avec surépaisseur sont galvanisées et un recouvrement de béton minimal de 60 mm est exigé. De plus, aucun élément d'acier non protégé tel que les tirants de coffrage ne doit se situer à moins de 50 mm de la surface finie des réparations.

La réparation en surépaisseur de la voûte du tunnel est possible partout sauf aux endroits où de nouveaux luminaires doivent être installés et ce, afin de maintenir le dégagement vertical à l'intérieur du tunnel. Pour permettre l'installation des luminaires, deux bandes de réparation sans surépaisseur dans chaque direction doivent être réalisées. Chacune des quatre bandes a une largeur de trois mètres, ce qui signifie qu'un total de 2 850 mètres carrés doivent être réparés sans surépaisseur comparativement aux 5 070 mètres carrés réparés avec surépaisseur. La figure suivante présente les deux types de réparation et leur localisation sur la voûte.

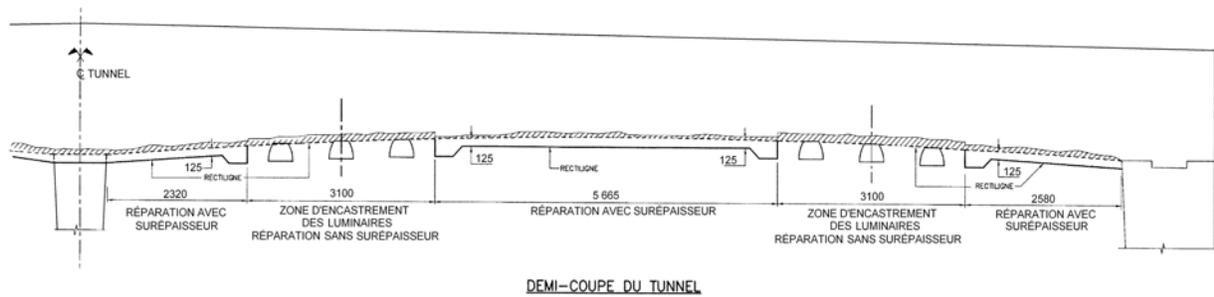


Figure 2 – Localisation des deux types de réparation

La réalisation de ces bandes de réparation sans surépaisseur pose cependant un important problème : tout au long du tunnel, les armatures transversales de la voûte présentent une épaisseur (en anglais : splice) à l'endroit où doivent être réalisées les deux bandes intérieures. Rappelons que la réparation sans surépaisseur exige le dégagement des armatures existantes lors de la démolition ce qui rendrait inefficace la jonction par recouvrement des barres à l'épissure. Puisque le tunnel doit demeurer sous charge et qu'il est impossible d'utiliser des supports temporaires, une analyse structurale de la voûte a été entreprise afin de déterminer une solution. L'analyse a démontré qu'il était possible de planifier la reconstruction dans les bandes par phases de façon à maintenir en tout temps suffisamment de capacité pour supporter les charges de terre, les charges routières sous les voies de circulation et le poids propre de la voûte.

Afin de faciliter et d'accélérer la démolition du béton dans les zones devant être réparées sans surépaisseur, un processus d'hydrodémolition a été permis au devis. L'hydrodémolition consiste à pulvériser le béton au moyen d'eau projetée sous très forte pression. Cette méthode de démolition a l'avantage d'être rapide, de bien dégager les barres d'armatures sans les abîmer et surtout d'être facilement réalisable en surplomb. L'hydrodémolition est par contre très bruyante, ce qui pose un problème de taille pour son utilisation lors de travaux de nuit en milieu urbain. Pour palier à ce problème, l'installation de rideaux anti-bruits amovibles aux extrémités du tunnel a été exigée aux documents contractuels.

La réalisation des travaux a été planifiée du printemps à l'automne 2003. Durant cette période, la réfection de l'ensemble de la voûte du tunnel est prévue de même que celle des murs extérieurs au-dessus des voies de l'autoroute. Il est également nécessaire de procéder au remplacement de l'ensemble des luminaires au plafond. Finalement, divers travaux de réparations au moyen de béton projeté sont prévus aux murs et aux colonnes centrales.

Des fermetures complètes de cinq nuits par semaine sont prévues pour la réalisation du contrat. Les fermetures débutent à 21 heures et doivent se terminer à 6 heures le lendemain. En excluant le temps nécessaire à l'installation de la signalisation, cet horaire de travail permet environ 7 heures de travail par nuit à l'entrepreneur.

### ***Réalisation en chantier***

Suite à l'appel d'offres, la firme Demathieu et Bard a été sélectionnée pour la réalisation des travaux. Le contrat de surveillance de l'ensemble des travaux de réfection de l'autoroute Décarie avait déjà été attribué au consortium Axor/Groupe Séguin. Ce sont donc les ingénieurs de ces firmes qui allaient assurer la surveillance des travaux de réfection au tunnel Notre-Dame-de-Grâce. Les premiers travaux au tunnel ont été entrepris à la fin du mois d'avril 2003.

#### **Première étape : Démolition**

La première étape des travaux consiste à procéder à la démolition du béton sur la voûte du tunnel. Rappelons que sur la majorité des surfaces du tunnel, une réparation avec surépaisseur doit être réalisée ce qui nécessite l'enlèvement du béton sur une profondeur minimale de 10 mm. Pour réaliser la démolition de ce type de surface, l'entrepreneur a fait appel à une fraiseuse à béton. Cet équipement permet de démolir rapidement une couche superficielle relativement uniforme d'environ 25 mm de béton sans endommager le substrat et a souvent été employé par le passé pour la démolition de surfaces de murs ou de dalles. Les travaux de démolition au tunnel requièrent par contre l'utilisation de cet appareil pour effectuer de la démolition en surplomb. Cette tâche a amené l'entrepreneur à modifier sa machinerie de façon à ce qu'elle puisse être installée dans la benne d'un camion et amenée en position de démolition au plafond au moyen d'un élévateur. L'utilisation du camion à benne rendait plus facile la récupération des débris. La photo suivante présente l'appareillage utilisé et son installation sur la voûte.



Figure 4 – Fraiseuse à béton sur la voûte et détail de la tête

Sur les surfaces devant être réparées sans surépaisseur, c'est-à-dire les zones d'installation des luminaires, rappelons que la démolition doit dégager les barres d'armature existantes et qu'un processus d'hydrodémolition avait été permis aux documents d'appel d'offres. Même en ayant recours à l'hydrodémolition, cette démolition s'effectue beaucoup plus lentement que celle des zones devant être scarifiées seulement. L'entrepreneur a par conséquent dû établir dès le départ des travaux une cédula de démolition et de réparation pour l'ensemble de la voûte. Il fallait de plus coordonner les différentes réparations en fonction des travaux de remplacement des luminaires, puisqu'une portion des luminaires existants ne pouvait être enlevée tant qu'une portion des nouveaux luminaires ne serait pas en place.

#### Deuxième étape : Coffrage des surfaces

Les coffrages employés par l'entrepreneur sont de type «préfabriqués réutilisables» fabriqués par la firme Péri. Les zones de réparation étant toutes de dimensions similaires sur la longueur du tunnel, l'utilisation de tels coffrages comporte de nombreux avantages. En outre, leur installation sur la voûte est très rapide et peut par conséquent facilement s'effectuer sur une période d'une nuit de travail. Les coffrages comportent une ouverture à leur point bas permettant d'y fixer la conduite de pompage du béton. Une ouverture au point haut est également prévue en cas de blocage de la première. Les ouvertures ont été fabriquées avec une trappe de type guillotine ce qui permet leur fermeture une fois les coffrages remplis de béton. La figure suivante montre une section de coffrages installée contre la voûte.



Figure 5 – Coffrages

Le béton autoplaçant devant être pompé dans les coffrages possède comme caractéristique principale une grande fluidité. Sa mise en œuvre exige par conséquent des coffrages étanches. L'utilisation de coffrages préfabriqués facilite l'atteinte de cet objectif mais il reste par contre un important détail; l'étanchéité entre le coffrage et le substrat de béton contre lequel il est posé. Suite à la démolition par scarification, la surface de la voûte présente de nombreuses aspérités et dépressions qui sont à peu près impossible à coffrer de façon parfaite. Pour étancher la jonction entre les parois du coffrage et la voûte, l'entrepreneur a donc recours systématiquement à de la mousse expansive sur tout le pourtour du coffrage. L'utilisation de la mousse expansive facilite également l'installation de tubes pour l'évacuation de l'air des coffrages.

Le ministère exige, afin d'assurer une bonne liaison entre la réparation et le substrat, que ce dernier soit humidifié jusqu'à ce qu'il soit saturé mais sec en surface au moment de la mise en place du béton. Pour atteindre cet état de surface au chantier, l'intérieur des coffrages est rincé à grande eau quelques heures avant d'entreprendre le bétonnage.

### Troisième étape : Bétonnage

Le béton de type autoplaçant employé par l'entrepreneur doit correspondre aux exigences du ministère tant pour ses propriétés mécaniques que pour sa maniabilité. Au cours des premières semaines du chantier, le béton employé est malaxé en usine et est amené au chantier au moyen de camions malaxeurs. Bien que cette façon de faire soit maintenant courante au Québec pour la production de béton autoplaçant, le fournisseur du béton a éprouvé beaucoup de difficultés à obtenir un mélange de béton stable et uniforme correspondant aux exigences du ministère. Suite à de nombreux rejets de camions au chantier et des retards dans l'horaire des travaux, l'entrepreneur a modifié sa façon de faire et le béton autoplaçant a été produit directement au chantier au moyen de bétonnières mobiles. Cette façon de produire le béton s'est finalement avérée très efficace et a été utilisée pour le reste des coulées.

Tout le béton a été mis en place au moyen d'une pompe à béton sur remorque. Conformément aux exigences du ministère, une section réductrice a été utilisée sur la ligne de pompage. La mise en place du béton sans vibration s'est effectuée sans problèmes, même sur des éléments de 12 mètres de longueur par 5 mètres de largeur. Une légère surpression de béton était induite dans le coffrage avant la fermeture de la trappe à l'entrée de ce dernier, de manière à obtenir un remplissage optimal. La figure suivante montre un bétonnage typique.



Figure 6 – Bétonnage typique et appareillage utilisé

Le ministère exige qu'une période minimale de 3 jours s'écoule avant le décoffrage des éléments de béton. Dans le cas des bétons autoplaçants, cette exigence est particulièrement importante car le gain de résistance s'effectue plus lentement que les bétons de masse volumique normale. Afin de maintenir sa production, l'entrepreneur utilise simultanément plusieurs coffrages sur le chantier au cours d'une même nuit. Ainsi, pendant que des ouvriers procèdent à la mise en place de coffrages sur une section de la voûte, d'autres procèdent à la coulée d'une section dont les coffrages ont été fixés lors d'une nuit précédente. Une autre équipe de travail peut travailler simultanément au décoffrage de surfaces déjà coulées. Comme la durée de la cure spécifiée par le ministère est de 7 jours, suite au décoffrage, une membrane de cure est appliquée sur les surfaces du béton.

Au total, 190 sections de béton devaient être réalisées pour l'ensemble des travaux de réparation de la voûte dans les deux directions du tunnel. L'entrepreneur a effectué l'ensemble des travaux de démolition, de coulée et de décoffrage sur un peu plus de 200 nuits de travail ce qui donne une cadence de production d'environ une section par nuit.

## Résultats

Des problèmes d'évacuation de l'air dans les coffrages ont été rencontrés à quelques reprises lors de la coulée des réparations avec surépaisseur ce qui a conduit à l'apparition de vides dans les réparations au niveau de l'interface substrat réparation. Afin de réparer ces vides, des trous de 19 mm sont d'abord forés dans la surface à traiter. Suite aux forages, les surfaces intérieures du vide sont nettoyées puis injectées. L'injection s'effectue au coulis de ciment pour des vides de moins de 10 mm d'épaisseur et au mortier de ciment pour une épaisseur supérieure. Des carottes forées suite aux réparations ont démontré leur efficacité. Éventuellement, une meilleure répartition des tubes d'évent sur le pourtour des coffrages a permis de régler en grande partie ces problèmes de vides.

Une fissuration de faible ouverture a été observée quelques jours suite à la coulée des réparations avec surépaisseur. L'apparition de cette fissuration est probablement liée au retrait empêché de la réparation sur le substrat stable du béton de la voûte. Bien qu'aucune mesure de cette fissuration n'ait encore été effectuée à ce jour, la quantité et l'ouverture des fissures semblent se comparer avantageusement à celle qui peut être typiquement rencontrée sur le même type de réparations effectuées au moyen de béton projeté.

Le béton obtenu au chantier par la bétonnière mobile est généralement de très bonne qualité, démontre peu de variabilité dans les résultats et présente d'excellentes caractéristiques de résistance et de durabilité. La résistance à la compression à 28 jours des échantillons surpasse largement les exigences de 35 MPa et les facteurs moyens d'espacement des vides mesurés des échantillons sont inférieurs aux exigences de 230 microns exigés par la norme BNQ. Le tableau suivant présente un résumé des résultats obtenus.

	Moyenne	Valeur minimale	Valeur maximale
Résistance à la compression à 28 j. (MPa)	51	40	60
Teneur en air (%)	7,5	6	10
Facteur moyen d'espacement des vides ( $\mu\text{m}$ )	155		

La figure suivante présente l'aspect final de la voûte une fois réparée suite à l'installation d'une des deux rangées de luminaires.



Figure 7 – Aspect final des réparations

### ***Conclusion***

Les travaux de réfection de la voûte au tunnel Notre-Dame-de-Grâce ont permis de démontrer qu'il était possible, et même préférable dans certaines conditions, d'utiliser un béton autoplaçant à grande échelle pour la réparation d'éléments en surplomb. Cette méthode novatrice a permis d'obtenir une réparation de qualité qui montre d'excellentes caractéristiques mécaniques et de durabilité.

L'ensemble des travaux de réparation sur près de 8 000 mètres carrés de surface de plafond a été réalisé sur une période de 7 mois au cours de l'année 2003. Aucune entrave à la circulation de jour n'a été nécessaire, l'ensemble des travaux se déroulant par périodes de 7 heures de nuit uniquement.

Je tiens en terminant à remercier M. François Lussier, ingénieur chez Axor et M. Jacques Beaulieu, ingénieur au Laboratoire de Béton Montréal pour la fourniture des données du chantier. Remerciements aussi à M. Jacques Prévost, ingénieur de la Direction des structures, à M. Réal Boisvert, technicien de la Direction de L'Île-de-Montréal ainsi qu'à M<sup>me</sup> Julie Hardy pour la révision de cet article.