



Table des matières

Dossier Systèmes de transport intelligents

Outil de confection et d'optimisation des circuits opérationnels sur le réseau routier 4

Environnement

Le biodiésel part en croisière 11

Routes et structures

Protection cathodique : tablier du pont d'étagement du chemin Upper-Lachine 18

Mot de présentation

Outil de confection et d'optimisation des circuits opérationnels sur le réseau routier

Dans le cadre de sa mission, le Ministère doit s'assurer de bien connaître l'état de son réseau en temps réel, de diriger adéquatement les équipes qui en effectuent l'entretien et, également, de répondre avec diligence à toute urgence survenant sur celui-ci.

Voici un défi complexe auquel les gestionnaires du Service de l'exploitation de la Direction de l'Estrée consacrent leurs énergies afin d'optimiser les opérations d'exploitation sur le terrain. Des activités ont été entreprises dans le cadre du projet STI Exploitation, notamment des équipements ont été montés dans les véhicules, et le système de repérage d'événements et d'opération est à l'étape de mise au point.

Cependant, la direction ne dispose pas d'outils intégrés permettant d'optimiser et de planifier ses déplacements pour réaliser les mandats en exploitation. À cet égard, elle a confié à l'École polytechnique de Montréal un projet de recherche en vue de concevoir des outils de confection et d'optimisation de circuits opérationnels tels que le monitoring, le marquage et l'entretien d'hiver. Le défi pour l'équipe de recherche est de tenir compte de tous les paramètres de planification pouvant influencer sur l'établissement des circuits.

En utilisant le nouveau système, la direction souhaite optimiser le temps de déplacement, mieux utiliser le parc de véhicules, réduire les coûts et diminuer les gaz à effet de serre.

Louis Ferland, directeur

Ministère des Transports, direction de l'Estrée

Outil de confection et d'optimisation des circuits opérationnels sur le réseau routier

Martin Trépanier, ing., Ph.D. et André Langevin, Ph.D., professeurs au département de mathématiques et de génie industriel de l'École Polytechnique de Montréal
Serge Hamel, contremaître, Direction de l'Estrée
Pierre Fernandez Galvan, ing., Ph.D.
Pierre Lambert, ing., M.Sc.A.

Pour réaliser sa mission, le ministère des Transports du Québec a toujours favorisé l'utilisation de nouvelles technologies en vue d'améliorer la gestion et l'exploitation des réseaux de transport ainsi que les services aux usagers. Dans cette optique, le Ministère a confié à l'École Polytechnique de Montréal un projet de recherche visant à développer de nouveaux outils de confection et d'optimisation des circuits (tournées) opérationnels. Ces outils s'insèrent dans une architecture informationnelle qui comprend des équipements GPS à bord des véhicules et une plateforme centralisée de gestion des événements opérationnels, qui sont notamment utilisés pour le monitoring de son réseau routier ainsi que pour la signalisation, le marquage et la viabilité hivernale.

CONTEXTE

Bien que le ministère des Transports dispose de systèmes d'informations géographiques et géomatiques qui lui permettent d'exploiter son parc d'infrastructures, d'en caractériser l'état et de déterminer les travaux à réaliser, il ne dispose pas, pour le moment, d'outils intégrés qui lui permettent de procéder à l'optimisation et à la planification de ses déplacements pour réaliser ces travaux. Dans le cadre du projet STI Exploitation, mis sur pied à la Direction de l'Estrée, les premiers efforts ont été consacrés à l'installation et au bon fonctionnement des équipements embarqués, au rodage du système de repérage des événements et des opérations ainsi qu'à l'exploitation des données opérationnelles.

L'outil mis au point à l'École Polytechnique est une composante d'un système expert devant servir à exploiter les données recueillies et aider à la planification des circuits effectués pour le monitoring, le marquage, la signalisation et l'entretien hivernal (dénégement et déglacage).

Les avantages prévus de l'utilisation d'un tel système sont l'optimisation des temps de déplacement, la réduction des distances pour ces déplacements, l'optimisation de l'utilisation du parc véhiculaire, la réduction de ses coûts opérationnels et d'entretien ainsi que la diminution des gaz à effet de serre. Pour le moment, les travaux de recherche et développement ont été axés sur le monitoring du réseau routier, mais l'outil mis au point permet d'envisager une utilisation étendue à d'autres activités courantes en exploitation. Cet article présente les problèmes liés à la recherche et à la mise en place, puis il décrit les fonctions développées dans l'outil ainsi que ses applications possibles.

VOLET SCIENTIFIQUE

La confection de circuits opérationnels fait depuis longtemps l'objet de recherches, et un très grand nombre de travaux scientifiques ont été publiés sur le sujet. La littérature s'attache essentiellement aux problèmes dit « des tournées sur les nœuds », comme les problèmes de livraison et de collecte, vu le très grand intérêt pour cette question dans le secteur des entreprises de distribution (problème dit « du commis voyageur » ou *travelling salesman problem*, TSP). Il y a cependant beaucoup moins de travaux traitant des tournées sur les arcs (tronçons) servant à déterminer un parcours permettant de desservir un groupe d'arcs.

On note dans ce type de tournées les problèmes dits « du facteur chinois » (*chinese postman problem*, CPP) où il s'agit de parcourir tous les arcs comme dans le cas du ramassage des ordures en milieu urbain. Il y a également les problèmes dits « du facteur rural » (*rural postman problem*, RPP), desservant un certain nombre d'arcs, sans nécessairement parcourir tous les arcs du réseau. Ces problèmes mathématiques se complexifient lorsqu'on doit tenir compte de contraintes opérationnelles telles que la capacité de production, la vitesse de déplacement, la vitesse d'exécution, la quantité de matériaux contenus dans la benne du véhicule, l'importance des travaux (prioritaires, nécessaires, souhaitables), les travaux réalisés par opposition aux travaux à faire. On parle alors de problème sur les arcs avec capacité (*capacitated rural postman problem* ou CARP).

Même si plusieurs chercheurs ont conçu des algorithmes permettant de confectionner des tournées à partir d'un problème de type CARP, ceux-ci sont rarement applicables en situation réelle. En effet, les conditions opérationnelles et le grand nombre de critères à prendre en compte rendent difficile l'intégration des algorithmes existants de façon « automatique » aux systèmes d'informations géographiques d'une organisation. De même, les algorithmes qu'on trouve dans les différents logiciels commerciaux ne répondent pas entièrement aux types de problèmes rencontrés. Au ministère des Transports, un outil de confection de circuits doit pouvoir concilier les éléments mathématiques aux données géométriques dont on dispose (système de référence par « route »-« tronçon »-« section »-« sous-section »-« chaînage » du réseau routier) et doit aussi tenir compte des exigences opérationnelles.

Afin de montrer la complexité des problèmes, nous présentons dans le tableau 1 quelques paramètres à prendre en compte dans la planification. Les paramètres ont été classés en cinq catégories afin de faciliter leur intégration dans l'outil. Dans le cas du déneigement, par exemple, il faut tenir compte des points de chargement du déglacant (paramètre ponctuel), des exigences de déneigement (paramètre linéaire car relatif à des segments précis), de la classe fonctionnelle (paramètre de type réseau caractérisant des tronçons routiers complets), des zones les plus touchées (contexte dans lequel se font les travaux) et des équipements disponibles (paramètres opérationnels à ne pas négliger).

Tableau 1 : Quelques exemples de paramètres de planification des opérations

Catégorie	Hiver	Monitoring	Marquage	Signalisation
Ponctuel	Lieu du dépôt Points de chargement	Lieu du dépôt Points noirs	Lieu du dépôt Points de chargement	Lieu du dépôt Destinations
Linéaire	Exigences de déneigement	Itinéraire forcé	Type de lignes	Vitesse réglementaire
Réseau	Classe fonctionnelle Type de chaussée	Classe fonctionnelle DJMA	Classe fonctionnelle Âge du revêtement	Classe fonctionnelle Réseau de camionnage
Contextuel	Zone touchée par la tempête Heures de pointe	Événements urgents	Gel/dégel Rupture du réseau	Période de travail
Opérationnel	Vitesse de déneigement Équipements disponibles	Trace de la tournée réalisée Durée de l'intervention	Vitesse de pose Nombre de camions traceurs	Échéanciers Banque de besoins

MÉTHODE DE PLANIFICATION DU MONITORAGE

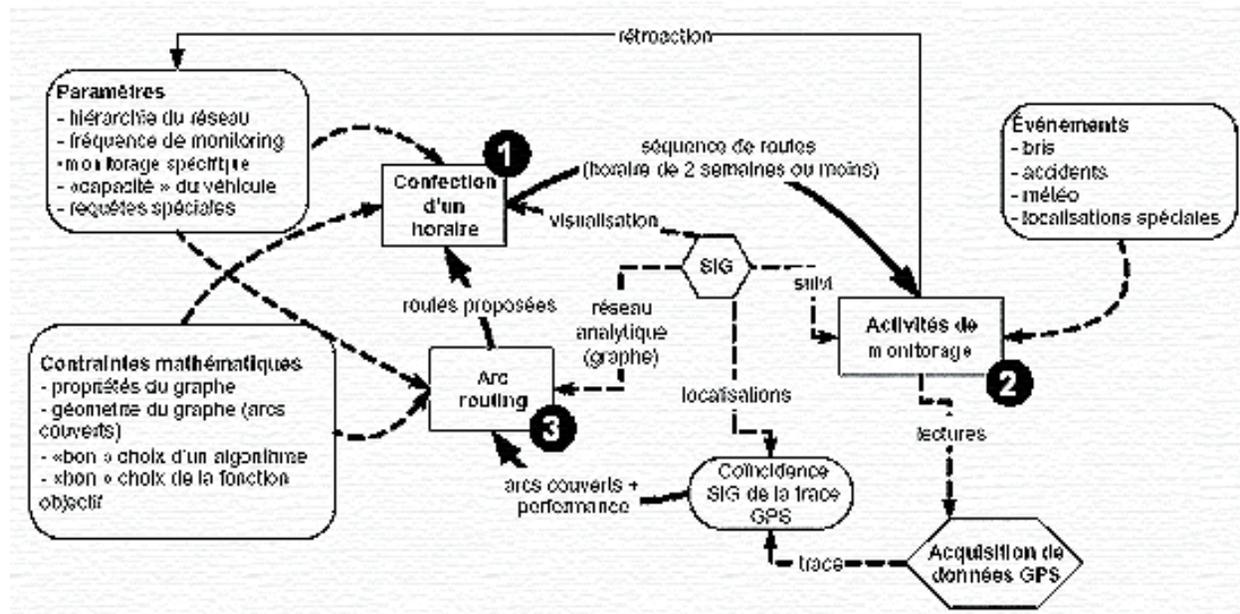
La conception des tournées nécessaires au monitoring du réseau routier est un problème qui déjoue les règles habituelles d'optimisation des tournées. En effet, il ne s'agit pas, dans un premier temps, de réduire les coûts de patrouille du circuit, mais bien de maximiser la couverture du réseau afin de respecter le cadre de surveillance ministériel et d'assurer un service qui réponde aux besoins du public. De plus, il faut considérer que les circuits théoriques ne sont pas entièrement effectués quotidiennement, en raison même de la nature du service de monitoring, qui est de répondre aux urgences et de se déplacer en fonction des aléas sur le réseau. Il est donc impératif d'en tenir compte dans la planification des circuits journaliers afin d'assurer l'atteinte hebdomadaire des objectifs du cadre de surveillance routière.

La planification des circuits implique deux dimensions, soit le chemin parcouru sur chacun des circuits pour respecter le cadre de surveillance routière et la dimension temporelle, c'est-à-dire un calendrier de deux semaines. Cette « flexibilité » opérationnelle entraîne une plus grande complexité sur le plan scientifique car elle multiplie les possibilités de conception et d'agencement des circuits. Dans cette perspective, l'École Polytechnique a mis au point une approche itérative de planification basée sur l'utilisation des nouveaux équipements STI (voir figure 1) et sur le processus de fabrication des produits et services. Le processus s'amorce par la planification d'un horaire de deux semaines établi à partir de la banque des circuits prédéfinis dont le planificateur dispose (voir point 1 de la figure). De façon journalière, les données GPS de la trace des parcours réalisés sont analysées afin de déterminer les segments routiers qui ont été réellement couverts par le monitoring (voir point 2 de la figure). Cela comprend entre autres les segments non prévus à l'origine, mais qui ont été couverts par choix de la part du préposé ou pour répondre à une situation urgente.

Un module de planification et de réorganisation détermine ensuite l'horaire de la tournée des circuits restants de la période, en tenant compte des arcs couverts (voir point 3 de la figure); il ajoute aux circuits « de base » d'autres circuits confectionnés

« artificiellement ». Les circuits en forme de « 8 » avec passage au dépôt sont notamment privilégiés car ils peuvent être facilement raccourcis. Ce procédé itératif peut être répété plusieurs fois pendant la période de deux semaines. Plusieurs méthodes de planification ont été testées en fonction des objectifs de couverture fixés pour chaque segment, selon sa classe fonctionnelle. Cette approche novatrice fera bientôt l'objet d'un article dans la revue *Computers and Operations Research*.

Figure 1 : Processus de planification des circuits de monitoring



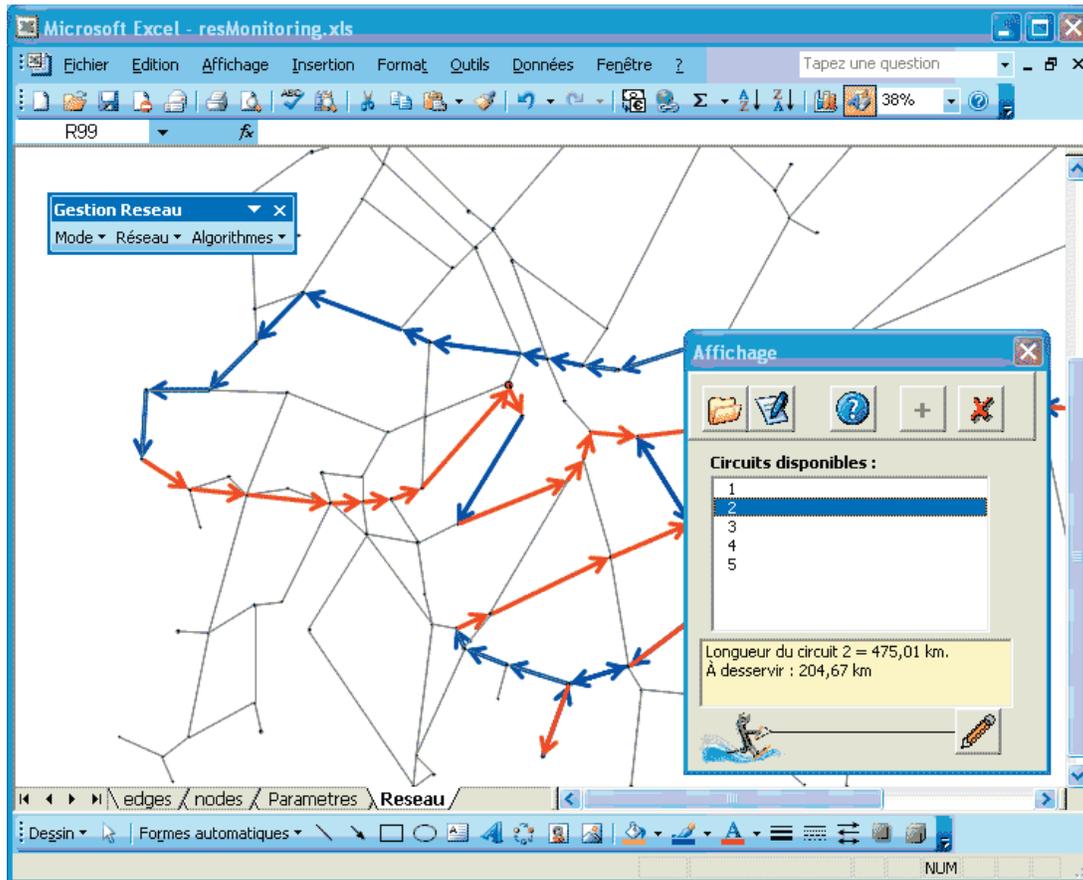
LIBRAIRIE INFORMATIQUE

À la suite du projet de planification du monitoring, il devenait impératif que le Ministère se dote d'un outil « général » de confection de tournées qui lui permette d'étendre les applications de l'optimisation à ses autres problèmes opérationnels, comme l'entretien de la signalisation, le déneigement et le marquage. Les algorithmes conçus ont été regroupés dans une librairie informatique Windows (DLL) pouvant facilement être couplée au système STI et à d'autres interfaces du Ministère.

Cette librairie orientée-objets comporte plus de 40 classes d'objets regroupés en 4 catégories :

- objets composant le réseau routier (routes, tronçons, sections, liens, nœuds);
- objets caractérisant le réseau routier (la liste d'attributs peut être modifiée à volonté);
- objets décrivant les déplacements opérationnels (circuits, chemins, groupes de circuits);
- objets permettant d'utiliser les algorithmes mathématiques.

Figure 2



Le tableau 2 présente les différents problèmes qui sont examinés par la librairie.

Tableau 2 : Classes de la catégorie « algorithmes »

Classe	Problème
algoArbor.cls	Arbres et arborescences
AlgoBellman.cls	Plus court chemin (algorithme de Bellman)
algoCarp.cls	Tournées de véhicules avec capacité
algoComponents.cls	Composantes connexes d'un graphe
algoComponentsFC.cls	Composantes fortement connexes
algoDfs.cls	Exploration de graphes
algoDijkstra.cls	Plus court chemin (algorithme de Dijkstra)
algoMaxFlotMinCout.cls	Flot de coût minimal
AlgoMaxFlow.cls	Flot maximal
algoParcoursPC.cls	Circuit de type facteur chinois
algoParcoursPR.cls	Circuit de type facteur rural
algoParcoursPRH.cls	Circuit de type facteur rural avec hiérarchie
algoTopSort.cls	Graphe en niveaux
AlgoTSP.cls	Circuit de type voyageur de commerce/Interface de prototypage

INTERFACE DE PROTOTYPAGE

Une interface de prototypage a été développée à l'aide du tableur Excel afin de valider la librairie informatique (Figure 2). Le tableur sert de façade de visualisation pour tester les algorithmes en prélude à l'intégration au système STI. Les données du réseau et les résultats sont stockés dans des fichiers Excel et Access (base de données). La transposition à des serveurs plus puissants, comme le SQL Server, s'en trouve facilitée car les codes de programmation sont compatibles.

L'utilisation d'Excel offre au planificateur l'avantage de pouvoir modifier différents paramètres des algorithmes et en visualiser rapidement les effets. De même, il est possible de modifier les données du réseau, comme les paramètres ponctuels et linéaires, pour mesurer leur influence sur le processus de planification.

Ces expériences serviront, à terme, à la détermination du niveau d'information qui devra être fourni à cet effet dans les bases de données centralisées du Ministère.

Applications de l'outil

La librairie développée est en voie d'être appliquée aux principaux problèmes opérationnels du Ministère : signalisation, monitoring, marquage et déneigement.

L'entretien de la signalisation est un problème de type commis-voyageur. Les circuits peuvent d'ores et déjà être planifiés à l'aide de la librairie. Cependant, une intégration informationnelle des nombreux critères de planification doit être faite pour rendre la planification interactive en fonction des besoins.

Bien qu'une procédure générale ait été établie pour planifier les activités de monitoring, il est nécessaire de concevoir un outil qui permettrait de modifier au besoin les circuits en fonction des segments couverts. La librairie dispose de tous les algorithmes nécessaires à cet effet.

Le problème du marquage a donné lieu aux travaux scientifiques les plus importants à cause de sa très grande complexité. Deux algorithmes mathématiques ont été spécifiquement développés pour traiter du problème des circuits de véhicules avec remplissage, où le camion marqueur, qui doit desservir une certaine séquence de segments routiers, est régulièrement rempli de peinture par un camion citerne qui doit lui aussi effectuer son circuit. Ces algorithmes font l'objet d'une publication scientifique dans la revue *Operations Research Letters*.

En ce qui concerne les travaux d'entretien hivernal, la question de l'optimisation concerne non seulement la planification des circuits, mais également l'affectation dynamique des équipes selon les aléas du climat. La complexité du problème tient principalement aux variations dans l'épaisseur de neige au sol à divers endroits sur le territoire ainsi qu'aux variations dans la quantité de neige d'une précipitation à l'autre.

PERSPECTIVES

Les perspectives associées au développement de l'outil de confection et d'optimisation des circuits sont doubles. Pour les chercheurs, il s'agit d'une occasion de faire avancer la science dans le domaine des algorithmes mathématiques et des systèmes d'information opérationnels et de maintenir l'expertise québécoise en la matière, qui est déjà assez développée. Pour le Ministère, il s'agit de se doter d'un outil de confection intégré à son système d'information, en vue d'une utilisation soutenue par les planificateurs. Le but est de tirer profit des données opérationnelles existantes pour concevoir des circuits qui soient mieux adaptés aux travaux à effectuer tout en requérant moins de ressources. La nature même de la librairie permet une mise à jour en continu des méthodes qui s'y trouvent ainsi qu'une utilisation étendue aux diverses opérations essentielles en exploitation, dont les principales sont le monitoring du réseau, les travaux d'entretien d'hiver, l'entretien de la signalisation et le marquage des lignes au sol.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- DROR, M. (2000) *Arc Routing: Theory, Solutions and Applications*. Boston, Kluwer Academic Publishers.
- GOODCHILD, M.F. (2000) « GIS and Transportation: Status and Challenges », *Geoinformatica*; vol. 4, n° 2, p. 127-139.
- HERTZ, A., LAPORTE, G. et MITTAZ, M. (2000) « A tabu search heuristic for the capacitated Arc routing problem », *Operations Research*, vol. 48, p. 129-135.
- TRÉPANIÉ, M., CHAPLEAU, R. et ALLARD, B. (2002) « Geographic information system for transportation operations: models and specificity », 30e conférence annuelle de la Société canadienne de génie civil, Montréal, p. 559-568.

Le biodiésel part en croisière...

Camil Lagacé, président Groupe Sine Nomine (1)

Durant l'été 2004, des bateaux de croisière alimentés au biodiésel ont navigué sur le fleuve Saint-Laurent et sur le canal de Lachine dans le cadre du projet BioMer. Une première dans le secteur maritime au Québec !

Le biodiésel a le vent en poupe depuis quelques années. Il suscite en effet de plus en plus d'intérêt, parce qu'il répond bien aux objectifs de réduction des gaz à effet de serre (GES), de protection de l'environnement, de développement durable et de sécurité énergétique dont le Québec se fait le promoteur. Il était donc normal qu'on lui cherche des vocations nouvelles, notamment dans le secteur maritime.



LE BIODIÉSEL, QU'EST-CE QUE C'EST ?

Le biodiésel est un ester méthylique obtenu par réaction chimique avec un alcool léger et des matières grasses végétales ou animales. On peut l'utiliser à une concentration de 100 % (B100), mais aussi le mélanger avec du pétrodiesel dans différentes proportions. Il est facile d'utilisation et n'exige pas de modifications des infrastructures de livraison et de distribution du carburant ni des moteurs diésels lorsqu'il est utilisé dans une concentration de 2 % (B2) à 20 % (B20).

Le biodiésel peut être produit avec des ressources locales renouvelables. Il offre une série impressionnante d'avantages : action positive sur l'effet de serre, sur la pollution atmosphérique et par conséquent sur l'environnement, le climat et la santé publique, limitation de la dépendance énergétique, progrès technologiques, création de richesse et d'emplois, etc. Au Québec, il présente en outre l'avantage de provenir principalement de la récupération et de la valorisation des matières résiduelles issues de l'industrie agroalimentaire, qui seraient autrement rejetées dans l'environnement avec un risque d'émanation de méthane, un des gaz à effet de serre.

Le biodiésel a d'ores et déjà fait ses preuves. Depuis plusieurs années, il a fait l'objet d'un grand nombre d'études et d'essais à diverses concentrations, avec différents types de moteurs, sur des millions de kilomètres. Partout dans le monde, il est le carburant de remplacement dont l'utilisation progresse le plus rapidement, surtout dans les secteurs du transport en commun et des services publics.

La société Rothsay de Ville-Sainte-Catherine (filiale d'Aliments *Maple Leaf*) possède la seule usine de production de biodiésel au Québec. Elle en produit commercialement depuis 2001, selon un procédé lui permettant d'utiliser des matières grasses recyclées, comme l'huile à friture et les graisses animales, qu'elle récupère directement des établissements (restaurants, abattoirs, etc.). Avec l'inauguration d'une nouvelle usine, en septembre dernier, la capacité de production de Rothsay est maintenant de l'ordre de 35 millions de litres par année, avec la possibilité de la doubler ultérieurement.

LE PROJET BIOMER : UNE RÉUSSITE SUR TOUS LES PLANS

BioMer est un projet québécois porteur, significatif, concluant, qui a suscité l'intérêt de partenaires majeurs, tant des administrations fédérale et provinciale que du secteur privé.

Il a été réalisé conjointement par Innovation maritime, le Groupe Sine Nomine et la société Rothsay, à l'été 2004, avec la participation financière des gouvernements du Québec (ministère des Transports et ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs) et du Canada. Il s'inscrit parfaitement dans la continuité du projet BioBus mis en oeuvre en mars 2002, qui visait à expérimenter l'utilisation du biodiésel comme carburant pour le transport en commun. Plutôt que de servir à approvisionner un parc d'autobus urbains, le biodiésel a été cette fois-ci mis à l'essai sur la flotte de douze bateaux de quatre croisiéristes de Montréal : Croisières AML, Le Bateau-Mouche au Vieux-Port de Montréal, Les Expéditions sur les rapides de Lachine (Saute-moutons et Jet St-Laurent) et Croisière canal de Lachine. Le projet a également bénéficié du soutien et de la collaboration de deux importants partenaires récréotouristiques, la Société du Vieux-Port de Montréal et Parcs Canada – Lieu historique national du Canal-de-Lachine.

Tous ces partenaires ont décidé de cibler une activité du secteur maritime de laquelle on pourrait tirer, pour le Québec, le maximum des avantages du biodiésel. Les croisiéristes du Saint-Laurent et du canal de Lachine exercent en effet leurs activités à proximité de zones habitées, dans des environnements particulièrement sensibles, ce qui en amplifie l'effet sur l'environnement.

L'utilisation du biodiésel est avantageuse dans ce secteur pour plusieurs raisons. D'abord, les émissions atmosphériques des bateaux en milieu urbain, qui s'ajoutent à celles des voitures, des autobus et des camions, s'en trouvent considérablement diminuées, ce qui s'inscrit parfaitement dans l'optique des objectifs visés par le protocole de Kyoto.

De plus, le biodiésel est considéré comme biodégradable (comme le sucre) et peu toxique (dix fois moins que le sel) dans la plupart des études ayant porté sur ces caractéristiques. Si cela s'avère fondé, son utilisation serait idéale dans les ports et sur les plans d'eau, là où l'environnement est particulièrement fragile. Grâce à ces caractéristiques, les déversements accidentels de biodiésel seraient moins dangereux pour l'environnement et pour les écosystèmes aquatiques.

Autre avantage, non négligeable dans ce secteur à vocation touristique, le biodiésel dégage moins d'odeur, ce qui le rend particulièrement bien adapté à la navigation de plaisance et aux croisières. Sa combustion est plus propre que celle du pétrodiesel et ne produit pas de ces fumées noires qui salissent la coque des bateaux. En améliorant la qualité de l'air et en préservant celle de l'eau, le biodiésel favorise le tourisme, un secteur d'activité très directement dépendant de l'intégrité du milieu.

TROIS GRANDS OBJECTIFS

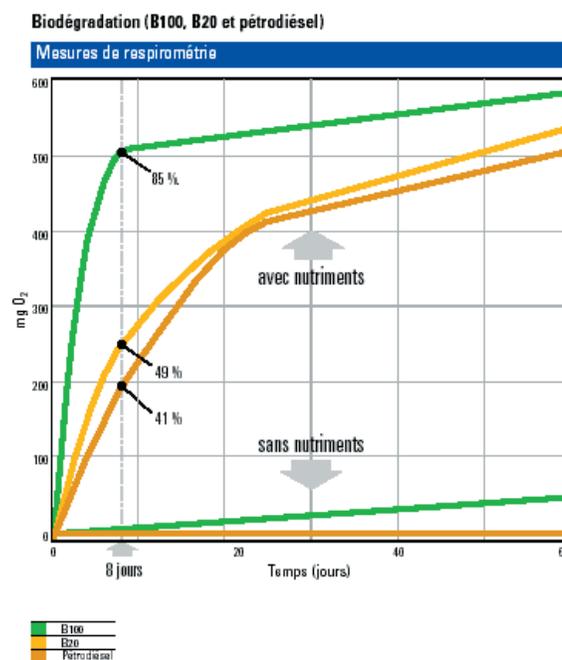
Le projet BioMer poursuivait les objectifs suivants :

- expérimenter l'utilisation du biodiésel pur (B100) comme carburant de remplacement du pétrodiesel pour les bateaux effectuant des croisières récréotouristiques de différents types et de gabarits divers;
- en évaluer les avantages dans le cadre des activités courantes de ce secteur;
- n mesurer les divers effets sur l'environnement (mesure des émissions polluantes, évaluation de la biodégradabilité et de la toxicité du biodiésel...).

Les informations qui suivent sont tirées du rapport final produit par les partenaires au printemps dernier.

APPROVISIONNEMENT EN BIODIÉSEL

Pendant toute la durée du projet BioMer, les douze bateaux ont consommé 116 875 litres de biodiésel fabriqué à partir d'huiles de friture, essentiellement à des concentrations de 100 % (B100), et dans certains cas mélangé à des concentrations de 5, 10 et de 20 % (soit B5, B10 et B20) avec du pétrodiesel.



CARACTÉRISATION PHYSICOCHIMIQUE DU BIODIÉSEL

Comme le biodiésel utilisé dans le projet BioBus, en 2002-2003, était le même que celui du projet BioMer, les données relatives à la caractérisation proviennent du premier projet. Les résultats des études confirmaient que le biodiésel pur produit par Rothsay respectait la norme américaine ASTM D 6751, la seule actuellement reconnue en Amérique du Nord pour le biodiésel pur. Une caractérisation complémentaire, effectuée à la fin du projet BioMer, corrobore ces résultats. De la caractérisation du biodiésel se dégage les constats suivants :

- Le biodiésel est un solvant léger. Il nettoie et maintient propres le réservoir, les conduits et le système d'injection. Même à une faible concentration, son onctuosité (le pouvoir lubrifiant du carburant) est de beaucoup supérieure à celle du pétrodiesel. L'usure du moteur est par conséquent réduite et sa durée de vie prolongée.
- L'indice de cétane (carbone d'hydrogène saturé – l'équivalent de l'indice d'octane pour l'essence) étant nettement plus élevé, la combustion se fait plus facilement, et généralement elle produit moins d'émissions de NOX. Le biodiésel pur fabriqué à partir d'huiles de friture a un indice de cétane de 52, comparativement à un indice de 42 pour le pétrodiesel ordinaire. De plus, cette augmentation a pour effet de favoriser l'allumage.
- La question du point de trouble du biodiésel ne posait pas de problème dans le cadre du projet BioMer, qui s'est entièrement déroulé durant la saison estivale. Il est toutefois intéressant de noter que, même si son point de trouble est plus élevé que celui du pétrodiesel, le biodiésel peut demeurer sécuritaire et efficace par temps froid à condition de modifier les proportions des mélanges (B2, B5 et B20) et de respecter certaines règles d'utilisation simples.
- Les mélanges de biodiésel sont stables sur le plan thermique, ils ne changent pas de façon significative, même s'ils sont exposés à des températures supérieures à 70°C.
- Parce qu'il est plus chargé en oxygène (11 %), le biodiésel assure une meilleure combustion du carburant auquel il est mélangé, ce qui contribue à réduire les émissions atmosphériques.

EFFETS DU BIODIÉSEL SUR L'EXPLOITATION DE LA FLOTTE DE BATEAUX DE CROISIÈRE

Du point de vue de l'exploitation, l'utilisation du biodiésel n'a donné lieu qu'à quelques incidents mineurs liés à des problèmes de filtres à carburant, ceux-ci s'obstruant rapidement et devant être changés à des intervalles très courts durant une certaine période. Il s'est avéré qu'un dégrasage provoqué par les propriétés dissolvantes du biodiésel était à l'origine de l'obstruction des filtres six semaines après l'introduction du biocarburant. Ces incidents n'ont pas eu de conséquences sur les activités des croisiéristes et n'ont pas compromis la continuité du service ni engendré de coûts significatifs imprévus, à part pour l'achat de nouveaux filtres. Quant à la performance des moteurs, il s'avère que même si le biodiésel a un contenu énergétique plus faible que le pétrodiesel, il a une meilleure combustion. Ainsi, l'utilisation du biodiésel permet en général une augmentation de la performance du moteur (puissance et couple), tout en consommant sensiblement le même volume de carburant dans le cas du B5 et du B20.

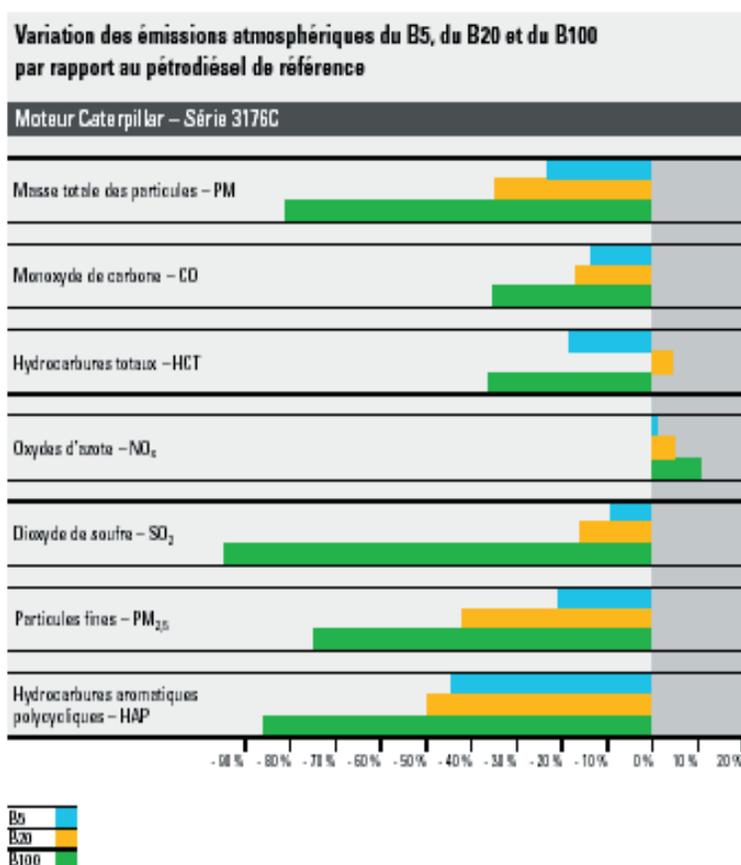
EFFETS DU BIODIÉSEL SUR LE SAINT-LAURENT

Afin de mieux connaître les effets de l'utilisation du biodiésel sur fleuve, une série restreinte d'essais de biodégradation et de toxicité a été réalisée à l'Institut de recherche en biotechnologie (IRB). Il en est ressorti que, comme prévu, le biodiésel se biodégrade 2,5 fois plus rapidement que le pétrodiesel, dans certaines conditions et à certaines concentrations. Par contre, la batterie réduite d'essais toxicologiques réalisée dans le cadre du projet BioMer ne permet pas de présenter de résultats concluants quant à la toxicité du biodiésel.

On voit dans le graphique 1 que la rapidité de dégradation du biodiésel B100 est différente de celle du pétrodiesel. Dans les meilleures conditions de laboratoire, le taux de biodégradation du biodiésel s'avère 2,5 fois supérieur à celui du pétrodiesel, 85 % du B100 s'étant dégradé après seulement 8 jours d'incubation à 20°C, contre 49 % pour le B20 et 41 % pour le pétrodiesel.

MESURES DES ÉMISSIONS ATMOSPHÉRIQUES

Les résultats des mesures des émissions atmosphériques avec l'utilisation du biodiésel et la comparaison avec les résultats obtenus dans une première série d'essais avec le pétrodiesel permettent de conclure, de façon globale, que le biodiésel réduit considérablement les émissions polluantes, PM, CO, HCT, SO₂, HAP et PM_{2,5}. En revanche, son utilisation augmente légèrement les émissions de NO_x.



ÉMISSIONS DIRECTES DE GAZ À EFFET DE SERRE (GES)

Les émissions de CO₂ à la sortie du moteur sont légèrement réduites, soit de 1 %, avec le biodiésel ; toutefois, en se basant sur l'analyse du cycle de vie, on calcule que chaque litre de biodiésel B100 utilisé en remplacement d'un litre de pétrodiesel permet une réduction de 3,19 kg de CO₂ équivalent (CO₂^{éq.}), selon le modèle GHGenius de Ressources naturelles Canada.

EFFET DE L'UTILISATION DU BIODIÉSEL PAR LES CROISIÉRISTES DE MONTRÉAL SUR LES ÉMISSIONS ANNUELLES DE GES

Le projet BioMer a démontré la viabilité de l'utilisation du biodiésel B100 par les bateaux de croisière. Dans le cadre de ce projet, la consommation totale de biodiésel de mai à octobre 2004 a entraîné une réduction des émissions de CO₂^{éq.} de l'ordre de 373 tonnes. Dans l'hypothèse où tous les bateaux participants auraient fonctionné au B100 pendant toute la saison des croisières (ce qui aurait représenté un total de 600 000 litres de biodiésel), la réduction des émissions de GES aurait été de l'ordre de 1 915 tonnes de CO₂^{éq.}

CONCLUSION

Les résultats du projet BioMer sont très prometteurs pour le secteur maritime. Ils ont en effet permis de prouver qu'il était possible de remplacer le pétrodiesel par du biodiesel pour alimenter des bateaux de croisière durant la saison estivale. Le projet a également démontré que les propriétés du biodiesel n'entraînaient pas ou peu de changements dans les conditions normales d'approvisionnement, d'utilisation, d'entretien et d'exploitation des bateaux. Le projet a finalement mis en lumière les avantages écologiques considérables que l'on peut tirer de l'utilisation plus répandue du biodiesel.

Il est clair que le projet ouvre de nouvelles perspectives dans le secteur maritime. Il a déjà permis de faire une importante percée en mobilisant les croisiéristes, leurs passagers et les organismes participants et en sensibilisant le grand public aux possibilités de ce biocarburant. Le projet BioMer a ouvert la voie à une vision plus écologique de ce secteur d'activité et il sert aujourd'hui de vitrine pour d'autres utilisateurs potentiels. L'objectif des prochaines expérimentations pourrait par exemple être de corroborer les résultats obtenus et de les adapter à d'autres types de bateaux (bateaux de plaisance, traversiers, marine marchande, flotte publique, bateaux de pêche, etc.) utilisés dans d'autres conditions d'exploitation (quatre saisons, par exemple).

Il est permis d'espérer que, dans un temps pas si lointain, les propriétaires de bateaux et de flottes de toutes sortes qui sillonnent notre fleuve, nos lacs et nos rivières auront la possibilité de choisir ce carburant non seulement adapté à leurs besoins mais également bénéfique pour l'environnement.

Pour plus d'informations sur BioMer ou pour consulter en ligne le rapport final du projet, visitez www.biomer.ca.

NOTE

- 1 *Groupe Sine Nomine* est une firme de services-conseils spécialisée dans le développement des marchés d'innovations technologiques dans les secteurs des transports et de l'énergie. M. Lagacé a dirigé les projets BioBus et BioMer. Il est par ailleurs directeur général du Conseil québécois du biodiesel (CQB).

Protection cathodique tablier du pont d'étagement du chemin Upper-Lachine

Nourredine Kadoum, M. Sc. A., CPI Corrosion Itée
Daniel Bouchard, ing., ministère des Transports du Québec

INTRODUCTION

Contexte

Dans le cadre d'un programme biennal, le ministère des Transports du Québec a effectué la réfection de toutes les structures au-dessus de l'autoroute 15, entre les autoroutes 40 et 720. Ces routes ont été construites à la fin des années 60 et leur moyenne d'âge est de 35 ans.

Sur une des structures, soit celle de la rue Upper-Lachine, les inspections générales et les différents relevés démontraient que des travaux d'entretien majeurs étaient requis. La structure est un pont d'étagement de type dalle évidée à cinq travées continues et à quatre voies de circulation, y compris un trottoir et un parapet de chaque côté ainsi qu'une bande médiane. La superficie de la dalle est d'environ 1 990 m².

Les rapports des inspections et des investigations effectuées montraient que les trois joints du tablier n'étaient plus étanches. Les infiltrations d'eau et de sel ont causé la détérioration du béton des culées, de la dalle évidée, des chevêtres et des piles.

Les travaux devaient être intégrés à ceux des autres structures afin de nuire le moins possible à la circulation sur l'autoroute et dans les rues de Montréal. Leur planification et celle de la gestion de la circulation étaient primordiales, étant donné que cette artère est le lien nord-sud le plus important sur le territoire de la ville de Montréal. Les travaux de réfection de la chaussée prévus par la Ville devaient aussi être pris en considération, et cette dernière devait en outre être consultée relativement à la déviation de la circulation et aux travaux qui sont sous sa responsabilité.

ÉTUDES RÉALISÉES

Pour déterminer l'état de la structure et les travaux d'entretien majeurs requis pour la dalle, les inspections et études suivantes ont été réalisées :

- prélèvement de carottes : des essais sur la résistance du béton, la teneur en ions chlorures, les caractéristiques du réseau de bulles d'air et l'absorptivité du béton ont été réalisés sur les carottes;
- relevé du potentiel de corrosion de la dalle, pour déterminer les zones où il y a risque de corrosion dans les aciers d'armature de la dalle.

ÉTAT DE LA STRUCTURE

Les résultats de l'investigation de la dalle du tablier sont les suivants :

- Résistance en compression du béton de la dalle mesurée sur deux carottes : 44,4 et 34,6 MPa;
- aucune des 12 carottes prélevées ne présentait de délaminage ou de détérioration;
- teneur moyenne en ions chlorures de 0,05 % dans les premier et deuxième 25 mm supérieurs du tablier, et de 0,03 à 0,13 % une profondeur de 50 à 75 mm;
- teneur en air : 9,1 %.

Les différentes inspections et investigations de la dalle montrent qu'elle est en bon état. À l'exception de la quantité de sel, qui dépassait les valeurs limites, la résistance du béton ainsi que la teneur en air étaient appropriées. Sur les 12 carottes prélevées en 1998, aucune ne présentait de délaminage ou de détérioration. Le relevé du potentiel de corrosion révélait une forte probabilité de corrosion sur moins de 6 % de la superficie.

MESURE PRIVILÉGIÉE

Compte tenu de l'état actuel de la dalle, et pour ne plus avoir besoin d'intervenir sur cette structure avant au moins 20 ans, le ministère des Transports a choisi de mettre en place un système de protection cathodique. Il est reconnu que la protection cathodique est une des méthodes les plus efficaces pour corriger la corrosion des armatures, car elle agit à la source même du processus de dégradation. Elle s'avère judicieuse, entre autres pour les dalles ayant des zones avec activité corrosive et dont la détérioration est limitée.

L'installation du système de protection cathodique arrête l'activité corrosive. Elle a comme avantage que le béton sain contaminé par les chlorures n'a pas à être enlevé.

Les expériences de protection cathodique à courant imposé qui ont déjà été faites au ministère des Transports du Québec ont montré que l'inconvénient majeur du système est qu'il nécessite un suivi périodique afin de s'assurer que le courant reste en tout temps à l'intérieur d'un intervalle spécifié. Le Ministère a donc exigé de l'entrepreneur qu'il fasse effectuer un suivi du système par une entreprise spécialisée au cours des dix prochaines années.

ÉTENDUE DES TRAVAUX

Les travaux consistaient à installer sur les voies carrossables ainsi que sur le trottoir nord un système de protection cathodique à courant imposé afin de protéger les aciers d'armature de la dalle du tablier de la structure contre la corrosion.

Dans le cas du trottoir, il a fait l'objet d'une reconstruction. Par conséquent, la protection du trottoir concerne les nouvelles barres d'armature en acier noir installées à l'occasion des travaux de reconstruction. Quant à la dalle, la protection contre la corrosion concerne les barres d'armature existantes.

CONCEPTION DU SYSTÈME DE PROTECTION CATHODIQUE

Le principe adopté pour la conception du système de protection cathodique vise la durabilité de l'investissement devant être consenti pour la réfection de la dalle du tablier du pont.

BESOIN EN COURANT DE PROTECTION

Le besoin en courant de protection prévu est de 20 mA/m² de surface d'acier. Ce chiffre, basé sur les recommandations de la NACE (National Association of Corrosion Engineer), pourra être moindre, selon le degré d'« agressivité » de l'environnement et les effets de la protection cathodique sur les surfaces d'acier après la mise en service du système.

Superficie à protéger

À partir des plans du pont et des relevés sur site, la superficie de voies carrossables et de trottoir à protéger a été estimée à :

- Trottoir nord = 230 m²
- Voies carrossables = 1 500 m²
- Total : 1 730 m²

ÉTUDE PRÉALABLE

Une étude préalable visait à définir les caractéristiques du site qui étaient nécessaires à la conception du système de protection cathodique, notamment le nombre de sections et d'électrodes de référence.

Les travaux effectués dans le cadre de l'étude préalable ont permis de déterminer les points suivants :

- État visuel de la surface du béton;
- recouvrement du béton;
- état de l'activité de corrosion dans les armatures;
- continuité électrique des armatures;
- résistivité du béton.

État visuel du béton

L'inspection du béton a permis d'observer un béton en bon état, qui ne présente aucun signe de dégradation majeure. Par ailleurs, comme il est indiqué précédemment, des échantillons de béton ont été prélevés sur la dalle du tablier. Leur inspection a confirmé le bon état général de la dalle.

Recouvrement du béton

Les travaux d'évaluation du recouvrement du béton ont permis de constater une certaine hétérogénéité dans la profondeur de recouvrement des aciers d'armature de la dalle des voies carrossables. Pour ce qui est du trottoir, il a été reconstruit et le recouvrement des aciers d'armature est d'une épaisseur suffisante et relativement homogène.



Dans le cas de la dalle, la profondeur du béton de recouvrement varie dans le sens transversal du tablier, de sorte que la profondeur de recouvrement est maximale près de la bande médiane centrale et minimale près des trottoirs (nord et sud). Les photographies ci-dessous font bien voir cette différence et montrent l'état du recouvrement à proximité du trottoir, comparativement aux abords de la bande médiane centrale.



État de l'activité de corrosion dans les armatures

L'état de l'activité de corrosion dans les aciers d'armature de la dalle des voies carrossables a été obtenu par des relevés du potentiel de corrosion. Les résultats de ces relevés montrent que les activités de corrosion sont majoritairement faibles à initiées. Les lectures de potentiels ont toutefois permis de relever des activités de corrosion un peu plus intenses sur la dalle des travées 1 et 2 relativement à la travée 3.

Continuité électrique des armatures

La continuité électrique a été vérifiée sur l'ensemble du réseau d'armatures de la dalle ainsi que du trottoir nord à la suite de sa reconstruction. Ces essais ont démontré que l'ensemble du réseau d'armatures de la dalle est continu de l'axe 1 à l'axe 7. De plus, les aciers d'armature du nouveau trottoir sont électriquement en continuité avec ceux de la dalle.

Résistivité du béton

La résistivité du béton de la dalle du tablier a été évaluée à divers endroits sur le pont, de façon à couvrir les travées 1, 2 et 3.

Les résultats de ces mesures ont montré un béton dont la résistivité est relativement homogène et de l'ordre de 20 000 à 30 000 ohms-cm.

DESCRIPTION DU SYSTÈME DE PROTECTION CATHODIQUE

En tenant compte des calculs de conception et des résultats de l'étude préalable, une conception détaillée du système de protection cathodique a été effectuée. Il comprend les principaux éléments suivants :

- Six sections distinctes, afin de limiter la surface des sections et de tenir compte du degré de l'activité de corrosion dans les aciers d'armature. Les sections sont désignées par un numéro, de la section 1 à la section 6;
- des sous-sections pour chacune des sections principales, afin de tenir compte de la différence d'épaisseur du béton de recouvrement;
- deux types de matériaux anodiques, l'un pour la dalle des voies carrossables et l'autre spécifiquement pour le trottoir nord. Ces matériaux anodiques a été choisis pour leur performance et en fonction des caractéristiques du site;
- neuf électrodes de référence ont été incluses dans le cadre de l'instrumentation du système de protection cathodique. Elles sont de type argent/chlorure d'argent et graphite;
- une sonde de température et d'humidité a été incorporée dans le béton de la dalle du tablier;
- un redresseur de courant pour alimenter le matériau anodique installé sur la dalle des voies carrossables ainsi que sur le trottoir nord;
- une unité d'acquisition de données pour l'interrogation du système de protection cathodique à distance et pour l'enregistrement des données de fonctionnement.

MISE EN SERVICE DU SYSTÈME DE PROTECTION CATHODIQUE

Les travaux d'installation des éléments du système de protection cathodique ont été achevés en juillet 2003. Les principales étapes de la mise en place des éléments du système se trouvent à la fin de l'article. Cela inclut l'ensemble des éléments installés dans le béton (matériau anodique, électrodes de référence, sondes, câblage...), les boîtes de tirage ainsi que le redresseur de courant, et l'unité d'acquisition de données mise en place dans un boîtier d'instrumentation.

Toutefois, ce système n'a pu être mis en fonction à cette date en raison de l'absence d'alimentation en courant alternatif et de ligne de téléphone. En effet, l'alimentation en courant alternatif n'a été en place qu'au cours de mai 2004, tandis que la ligne téléphonique nécessaire à l'interrogation de l'unité d'acquisition de données n'a été libérée qu'au mois d'août 2004.

ESSAIS PRÉALABLES À LA MISE EN SERVICE

Préalablement à la mise en service du système de protection cathodique, des essais ont été réalisés sur les éléments de ce système, soit :

- La vérification des circuits et des principaux éléments du système de protection cathodique;
- les lectures des résistances de circuits des différentes sections et sous-sections du système de protection cathodique;
- les lectures des potentiels « statiques » des électrodes de référence permanentes.

La vérification des circuits a montré que l'ensemble des éléments du système de protection cathodique était bon.

Les résistances des circuits d'anode des sections 1 à 6 sont homogènes et de l'ordre de 0,30 à 0,55 ohm. La résistance de 0,55 ohm a été obtenue pour la section 2, qui se caractérise par la superficie la moins élevée. Quant aux autres sections, les résistances obtenues sont comparables, et ce, en tenant compte des superficies de chacune d'entre elles.

Ce constat démontre que les sections sont parfaitement équilibrées et que l'installation n'a induit aucune résistance particulière.

MISE EN SERVICE DU SYSTÈME

La mise en service du système de protection cathodique a été effectuée le 19 mai 2004, à la suite de l'installation de l'alimentation en courant alternatif.

Cette mise en service a permis de mettre en fonction le redresseur de courant avec une capacité égale à environ 20 % du besoin en courant maximal, estimé à 27 ampères. De ce fait, la capacité du redresseur a été ajustée à 6 ampères.

À cette date, comme on ne disposait pas de la ligne téléphonique pour le suivi du fonctionnement du système de protection cathodique, des visites régulières sur le site, effectuées par notre personnel, ont permis de nous assurer du fonctionnement du système durant la période allant de mai à août 2004.

SUIVI DU SYSTÈME DE PROTECTION CATHODIQUE

Le suivi du système de protection cathodique consiste à s'assurer que les sections du tablier du pont reçoivent un courant de protection suffisant pour permettre une polarisation des aciers d'armature, et donc une protection adéquate contre la corrosion.

Relativement à cela, le suivi du système de protection cathodique du tablier du pont d'étagement du chemin Upper-Lachine est basé sur le suivi à distance des paramètres de fonctionnement du système, effectué au moyen d'une unité d'acquisition de données interrogeable à distance à l'aide d'une ligne téléphonique et d'un ordinateur muni d'un modem.

Ce suivi n'a pu être assuré qu'à partir du mois d'août 2004, c'est-à-dire depuis la mise en service de la ligne téléphonique reliée au système.

ÉLÉMENTS DU SUIVI DU SYSTÈME DE PROTECTION CATHODIQUE

Le suivi du système de protection cathodique du pont Upper-Lachine est basé sur l'utilisation de l'unité d'acquisition de données pour la lecture et la sauvegarde des lectures des paramètres suivants du système :

- La tension nécessaire à la circulation du courant de protection pour chacune des sections;
- le courant de protection circulant sur chacune des sections;
- les potentiels « On » des neuf électrodes de référence permanentes;
- les potentiels « Off » des neuf électrodes de référence permanentes;
- la température du béton telle qu'elle a été relevée par la sonde de température enfouie dans le béton;
- l'humidité du béton telle qu'elle a été relevée par la sonde d'humidité enfouie dans le béton.

INTERPRÉTATION DES LECTURES DU SYSTÈME D'ACQUISITION DE DONNÉES

Les lectures obtenues et enregistrées par l'unité d'acquisition de données sont exprimées en :

- Volts pour la tension des sections du tablier du pont;
- ampères pour le courant de protection des sections du tablier du pont;
- millivolts pour les potentiels des électrodes de référence;
- millivolts pour les sondes de température et d'humidité.

En ce qui concerne les sondes de température et d'humidité, l'obtention des valeurs réelles de la température et de l'humidité nécessite une conversion des lectures obtenues par l'unité d'acquisition de données. Elle est basée sur les caractéristiques suivantes :

DONNÉES DU SUIVI DU SYSTÈME POUR LES MOIS

Données du suivi

Le suivi à distance du système de protection cathodique a débuté le 27 août 2004. Il est fonctionnel depuis le 14 mai 2004 et par conséquent, les aciers d'armature du tablier reçoivent des courants de protection depuis cette date.

Le suivi à distance a consisté à enregistrer les lectures des paramètres du système de protection cathodique à une fréquence d'une lecture par jour.

PERFORMANCE DU SYSTÈME DE PROTECTION CATHODIQUE

Une dépolarisation du système de protection cathodique a été effectuée durant cette période de suivi afin d'en évaluer la performance. L'opération consiste à annuler le courant de protection contre la corrosion durant une certaine période et à mesurer les potentiels des électrodes de référence avant et durant la période d'annulation du courant.

La dépolarisation est obtenue à partir des électrodes de référence permanentes installées dans le béton. Elle correspond à la différence entre le potentiel « Off » de l'électrode avant l'annulation du courant de protection et le potentiel obtenu après une période d'annulation du courant.

La dépolarisation du système de protection cathodique du pont Upper-Lachine a été réalisée du 28 août au 1^{er} septembre 2004, durant une période de près de 100 heures. Les données de cet essai sont présentées dans le tableau de synthèse ci-après.

À des fins de synthèse, les potentiels « Off » avant annulation du courant qui ont été obtenus, après 24 heures et après 100 heures de dépolarisation, pour chacune des électrodes de référence permanentes sont donnés au tableau ci-dessous :

Électrode	Potentiel «Off» avant annulation du courant (mV)	Potentiel 24 hres après annulation du courant (mV)	Potentiel 100 hres après annulation du courant (mV)	Dépolarisation obtenue après 24 hres (mV)	Dépolarisation obtenue après 100 hres (mV)
EA1	+ 98	+ 289	+ 266	191	168
EA2	- 293	- 69	- 77	224	370
EA3	- 214	- 117	- 117	97	97
EA4	- 436	- 314	- 310	122	126
EA5	- 333	- 130	- 139	203	194
EA6	- 396	- 134	- 140	143	256
EA7	- 412	- 269	- 256	143	156
EG8	-333	-154	-156	179	177
EG9	-243	-149	-145	94	98

Il est à noter que relativement à la norme RP-0290 «*Impressed Current Cathodic Protection of Reinforcing Steel in Atmospherically Exposed Concrete Structures*», la performance du système de protection cathodique est essentiellement évaluée à partir du critère suivant :

Une dépolarisation de 100 mV doit être atteinte dans la partie la plus anodique de chaque zone ou surface de 50 m².

Toutefois, l'expérience montre que, dans le cas de structures neuves ou réparées, une dépolarisation de l'ordre de 50 mV peut être jugée suffisante pour évaluer la performance d'un système de protection cathodique.

En tenant compte du critère de protection et des données de la dépolarisation réalisée sur le système de protection cathodique du pont Upper-Lachine, il apparaît que la dépolarisation obtenue pour chacune des électrodes de référence permanentes est largement suffisante pour satisfaire au critère de protection.

Par conséquent, le système de protection cathodique est, d'une part, parfaitement fonctionnel et, d'autre part, suffisamment performant pour assurer la protection contre la corrosion des aciers d'armature du tablier du pont.

CONCLUSION

Les essais préalables à la mise en service ainsi que ceux du suivi du système de protection cathodique démontrent que ce dernier fonctionne conformément aux exigences du devis. De plus, il offre une performance adéquate pour assurer la protection contre la corrosion des aciers d'armature du tablier du pont.

Le ministère des Transports du Québec a donc réalisé deux principaux projets de protection cathodique sur les ponts.

La première structure est le pont Taschereau. Dans ce projet, le plus gros problème rencontré à la suite de la mise en place du système de protection cathodique sur trois travées fut un manque de rigueur dans le suivi. Le courant doit demeurer en tout temps à l'intérieur d'un intervalle spécifié et cette exigence n'a pas été respectée. Alors que le système a fonctionné moins de 50 % du temps, une étude a permis de constater que le taux de dégradation était de 12 % sur les travées protégées comparativement à 99 % sur celles qui n'avaient pas de protection.

Pour remédier au problème rencontré, le Ministère a choisi, pour la seconde structure, de confier le suivi à un spécialiste dont la préoccupation première est la protection contre la corrosion.

Nous espérons que le système mis en place sur le pont Upper-Lachine démontrera hors de tout doute que la protection cathodique est une mesure rentable.







