

Publié par : Faculté des sciences de l'administration
Published by : Université Laval
Publicación de la : Québec (Québec) Canada G1K 7P4
Tél. Ph. Tel. : (418) 656-3644
Fax : (418) 656-7047

Édition électronique : Aline Guimont
Electronic publishing : Vice-décanat - Recherche et partenariats
Edición electrónica : Faculté des sciences de l'administration

Disponible sur Internet : <http://www.fsa.ulaval.ca/rd>
Available on Internet rd@fsa.ulaval.ca
Disponible por Internet :

DOCUMENT DE TRAVAIL 2003-023

DESIGN D'UN RÉSEAU D'ENTREPÔTS EN TRANSPORT URBAIN

Fayez F. Boctor
Jacques Renaud
Sébastien Bournival

Version originale : ISBN – 2-89524-173-2
Original manuscript :
Version original :

Série électronique mise à jour : 05-2003
On-line publication updated :
Seria electrónica, puesta al día

DESIGN D'UN RÉSEAU D'ENTREPÔTS EN TRANSPORT URBAIN

FAYEZ F. BOCTOR^{1,2}, JACQUES RENAUD^{1,2}, SÉBASTIEN BOURNIVAL¹

¹Centre de Recherche sur les Technologies de l'Organisation Réseau (Centor),
Université Laval, Canada G1K 7P4

²Faculté des Sciences de l'administration, Université Laval, Québec, Canada G1K 7P4

Résumé

Cet article étudie le problème de la localisation d'entrepôts pour les autobus en transport urbain. Nous proposons deux modèles de programmation linéaire permettant de minimiser le kilométrage à vide parcouru par les autobus. Les modèles ont été testés à l'aide des données du Réseau de Transport de la Capitale (RTC) de la ville de Québec. Les résultats obtenus permettent d'identifier les localisations les plus intéressantes et démontrent que des réductions importantes du kilométrage parcouru à vide peuvent être réalisées si le RTC implante un nouvel entrepôt. Les économies découlant de la réduction du kilométrage à vide permettent de rentabiliser l'ouverture du nouvel entrepôt en 6 années. Finalement, l'impact sur la congestion des routes est également analysé.

Mots clés : Optimisation, kilométrage à vide, autobus urbain, localisation d'entrepôts.

1. Introduction

Cet article évalue la possibilité d'ouvrir de nouveaux entrepôts pour la société de transport en commun de la ville de Québec, appelée le *Réseau de Transport de la Capitale* (RTC), afin de réduire le kilométrage à vide effectué par les autobus. L'environnement du transport en commun est en perpétuel changement. Il doit s'adapter à une clientèle qui demande une couverture élargie du réseau tout en maintenant un niveau de service élevé, le tout à l'intérieur d'un cadre financier restreint. Afin d'offrir un service de qualité, le RTC peut, à l'intérieur de certaines balises, modifier la configuration des parcours ainsi que le nombre de véhicules sur la route. Malheureusement, la performance de toute entreprise de transport en commun est également liée à une variable sur laquelle elle ne possède aucune influence : le niveau de trafic sur le réseau

routier où elle opère. Depuis 1999, le trafic sur les autoroutes de la ville de Québec est devenu beaucoup plus dense. Par exemple, la circulation sur les autoroutes Henry IV, Duplessis et La Capitale a considérablement augmenté. Cette nouvelle tendance engendre plusieurs problèmes pour le RTC qui gère actuellement sa flotte à partir d'un entrepôt unique localisé à proximité de l'autoroute la plus congestionnée du réseau (l'autoroute La Capitale). Ainsi, les retours à l'entrepôt ne s'effectuent pas toujours à l'heure prévue à cause de la congestion sur les autoroutes ce qui occasionne divers problèmes (retard lors des changements de chauffeurs, allongement imprévu des heures de travail, ...).

S'il est impossible d'éliminer les engorgements de la circulation, il est cependant possible de les contourner en localisant judicieusement les autobus en divers points du réseau routier. Cet article étudie donc la possibilité de créer un ou plusieurs entrepôts satellites qui permettraient aux autobus de réduire les distances à parcourir à vide pour atteindre les terminus et d'éviter les segments souvent congestionnés du réseau routier à l'entour de l'entrepôt actuel.

Les principales contributions de cet article sont les suivantes. Dans un premier temps nous allons présenter deux modèles multi périodes permettant d'allouer les autobus aux divers entrepôts afin de minimiser le kilométrage à vide. Ces modèles permettent de respecter en tout temps la capacité des entrepôts. Deuxièmement, en tenant compte des coûts de construction et d'opérations des entrepôts, nous proposons une analyse permettant de sélectionner les localisations les plus intéressantes pour établir de nouveaux entrepôts. Finalement, à l'aide des modèles développés, nous soulignons l'impact sur la réduction du trafic de l'ouverture de l'entrepôt sélectionné. Toutes ces analyses sont effectuées à l'aide des données réelles du Réseau de Transport de la Capitale.

La suite de cet article est organisée comme suit. La Section 2 présente brièvement le RTC ainsi que quelques données sur l'industrie du transport en commun au Canada. La Section 3 présente la littérature relative à la gestion du transport urbain et particulièrement les travaux portant sur le problème de minimisation du kilométrage à vide. Les modèles proposés sont développés à la Section 4. La Section 5 applique ces modèles aux données du Réseau de Transport de la Capitale et analyse quelques scénarios d'ouverture de nouveaux entrepôts. Nos

conclusions suivent à la Section 6.

2. Le Réseau de Transport de la Capitale

La mission du RTC se définit comme suit : « *Le Réseau de Transport de la Capitale fournit à la population des services de transport en commun de qualité, et ce, au meilleur coût possible. Dans la réalisation de sa mission, le RTC vise à contribuer de plus en plus à un environnement sain, à un aménagement urbain de qualité, et au soutien du développement économique, social et culturel de la région.* ». Le transport en commun dans la ville de Québec existe depuis 1864 lorsqu'un groupe de citoyens a doté la ville d'un service de chars tirés par des chevaux. Par la suite, en 1897, les tramways électriques commençaient à circuler dans les rues de Québec. Les premiers autobus sont apparus en 1938 et dix ans plus tard les tramways ont disparus. En 1969 est créé la Commission de Transport de la Communauté Urbaine de Québec (CTCUQ) qui fait alors l'acquisition graduelle des entreprises de transport privé. De 1988 à 1994 la CTCUQ connaît un essor important, implantant entre autre le service de Métrobus rapides en 1992. En 1994, la CTCUQ devient la STCUQ (Société de Transport de la Communauté Urbaine de Québec). Finalement, le 24 avril 2002, suite aux fusions municipales décrétées par le gouvernement provincial, la STCUQ devient le Réseau de Transport de la Capitale (RCT), dénomination qu'elle utilise actuellement (<http://www.stcuq.qc.ca/>).

Le RTC possède une flotte de 508 autobus répartis sur 91 parcours distincts et compte sur des effectifs de 1 205 employés dont 720 chauffeurs. Le réseau s'étend sur environ 600 kilomètres et les autobus du réseau parcourent 22 393 000 kilomètres annuellement. Durant une journée, approximativement 107 600 passagers et passagères sont transportés par les autobus du Réseau de Transport de la Capitale, ce qui représente environ 39,275 millions de passagers annuellement.

Au niveau canadien, l'industrie du transport en commun est très importante. Le chiffre d'affaires des fournisseurs de transport urbain a été de 2,0 milliards de dollars en 2000 (sans les subventions), en progression de 7,5 % par rapport à 1999. Ces derniers ont transporté 1,51 milliard de passagers, en hausse de 4,2 %, ce qui leur a valu leur meilleur taux de croissance depuis 1986. Ce niveau est juste en deçà du sommet inégalé de 1,53 milliard de passagers atteint

en 1990. L'achalandage du transport urbain s'est considérablement accru depuis son creux de 1996 où il était tombé à 1,36 milliard de passagers (<http://www.statcan.ca>). Avec l'augmentation de la population et les efforts gouvernementaux vers la réduction des gaz à effet de serre, le rôle du transport en commun dans le développement économique des grandes villes canadiennes ne fera qu'augmenter au cours des prochaines années. Il importe donc de bien gérer sa croissance.

3. Revue de la littérature

Le processus de planification en transport urbain peut être décomposé en quatre étapes inter reliées présentées à la Figure 1 (Haghani, Banihashemi et Chiang, 2003). Nous allons brièvement présenter la littérature associée à chacune de ces étapes sachant que certains travaux peuvent en couvrir plusieurs simultanément. Une attention particulière sera également portée aux contributions portant sur l'affectation des véhicules aux entrepôts et la minimisation du kilométrage à vide.

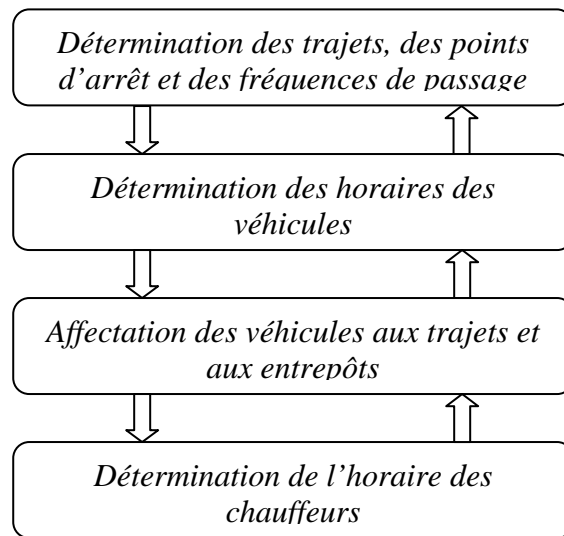


Figure 1

Principales étapes du processus de planification du transport en commun

La première étape consiste à effectuer le design des trajets afin de couvrir le territoire à desservir ainsi qu'à déterminer les points d'arrêts et les fréquences de passage. La détermination des routes qui vont desservir le territoire (*route network design*) est un problème très important puisqu'il conditionnera les étapes suivantes. Pattnaik, Mohan et Tom (1998) utilisent un algorithme génétique pour générer et sélectionner les routes du réseau. Le problème de

détermination des fréquences de passage (*trip frequency scheduling*) cherche à allouer un nombre suffisant d'autobus aux différents parcours en fonction de la demande de ceux-ci sur divers intervalles de temps tout en tenant compte de contraintes pratiques (nombre d'autobus disponibles, capacité des autobus, capacité des entrepôts, ...). Van Oudheusden et Zhu (1995) et Sinclair et Van Oudheusden (1997) ont testés diverses approches pour résoudre ce problème à l'aide de données réelles de la société de transport de Bangkok. Bouzaïene-Ayari, Gendreau et Nguyen (2001) étudient le problème des arrêts d'autobus (*bus stop problem*) qui consiste à estimer la distribution des passagers entre les divers trajets potentiels et le temps d'attente des passagers aux arrêts. Ils présentent une revue des modèles existant.

À la seconde étape, le problème de la détermination des horaires des véhicules (*trip frequency*) consiste à assigner les autobus d'un ou plusieurs entrepôts à un ensemble prédéterminé de trajets. Le nombre de trajets à couvrir peut varier en fonction de l'intervalle de temps durant la journée (Van Oudheusden et Zhu, 1995 ; Sinclair et Van Oudheusden, 1997 ; Haghani, Banihashemi et Chiang, 2003). Ceder, Golany et Tal (2001) étudient un problème de synchronisation d'horaire particulier qui consiste maximiser le nombre d'autobus arrivant simultanément à un point de transfert du réseau.

Lorsque les horaires des véhicules ont été déterminés, il faut affecter les autobus aux différents entrepôts, c'est la troisième étape. Chaque autobus doit parcourir une distance à vide afin d'atteindre, à partir de son entrepôt, le point de départ du trajet qu'il doit effectuer (le terminus) et pour revenir ensuite du point de fin de sa course vers l'entrepôt. Dans la littérature, ce problème est appelé le problème de minimisation du kilométrage à vide (*optimizing dead mileage in urban bus routes*). En d'autres termes, le kilométrage à vide est la distance qui ne procure pas de revenus à l'entreprise et où l'autobus ne transporte aucun passager. Prakash, Balaji et Tuteja (1999) proposent une approche multi objectifs qui cherche à minimiser la distance totale à vide parcourue par les autobus et à minimiser la distance à vide maximale parcourue par un véhicule. Kasana et Kumar (2000) proposent une extension permettant de traiter p objectifs et reprennent les données de Prakash, Balaji et Tuteja (1999). Il est à noter que ces contributions tiennent compte de la capacité des dépôts à l'intérieur d'une période de temps correspondant à une journée complète. De plus, les autobus doivent partir et revenir du même

entrepôt. Les modèles que nous proposons relaxent ces deux hypothèses. La Figure 2 illustre la problématique du kilométrage à vide à l'aide d'un exemple du Réseau de Transport de la Capitale. Elle illustre la distance à vide de la course 1024. Le point 1 sur cette figure correspond à l'entrepôt, le point 2 au point d'entrée (terminus 8) de la course et le point 3 à son point de sortie (terminus 51). Le kilométrage à vide de l'entrepôt au point d'entrée est de 14,2 kilomètres et il est de 6,1 kilomètres pour le retour. La course 1024 fait donc un total de 20,3 kilomètres à vide.

Finalement, Lourenço, Paixão et Portugal (2001) étudient le problème de détermination des horaires des chauffeurs d'autobus (*bus-driver scheduling problem*) qui consiste à déterminer une allocation des chauffeurs à l'ensemble des trajets (voir également Paias et Paixão, 1993 et Ferreira et Guimarães, 1995). Comme il s'agit d'un problème complexe, les auteurs proposent une heuristique qui combine la recherche tabou et l'algorithme génétique. Les résultats ont été comparés avec diverses méthodes utilisées en pratique.

Notons que l'affectation des véhicules aux trajets et des chauffeurs aux véhicules (*vehicle and crew scheduling problem*) peut être effectuée de façon simultanée (Haase, Desaulniers et Desrosiers, 2001 ; Valouxis et Housos, 2002). Ball, Bodin et Dial (1983) soulignent que l'affectation simultanée est supérieure à l'approche séquentielle qui consiste à affecter les autobus aux trajets puis les chauffeurs aux autobus puisque les coûts associés aux chauffeurs dominant généralement les coûts associés aux autobus. Haase, Desaulniers et Desrosiers (2001) proposent un algorithme optimal basé sur la génération de colonnes pour résoudre le cas où les autobus sont identiques et localisés à un seul entrepôt.



Figure 2

Un exemple de kilométrage à vide au Réseau de Transport de la Capitale

Plusieurs logiciels ont été développés pour supporter diverses tâches reliées à la planification du transport urbain. Sans prétendre tous les connaître, notons notamment HASTUS (Rousseau, Lessard et Blais, 1985) de la compagnie Giro Inc. qui est utilisé dans une multitude de pays, IMPACS (Smith et Wren, 1988) qui est implanté dans plus d'une trentaine d'organismes de transport ainsi que HOT (Daduna et Mojsilovic, 1988). Le Réseau de Transport de la Capitale utilise actuellement HASTUS 5.10 afin de programmer les horaires des chauffeurs.

Notons, pour terminer cette revue de la littérature, d'autres contributions reliées au transport urbain mais abordant des problématiques différentes. Kuah et Perl (1988, 1989) étudient un problème de transport urbain particulier qui consiste à effectuer le design d'un réseau d'autobus afin de maximiser l'accessibilité à un réseau ferroviaire existant (*feeder-bus network-design problem*). Kuah et Perl (1989) assument que la localisation des arrêts est spécifiée et se concentrent sur la détermination des routes et des fréquences de passage des autobus. Ils proposent entre autre une généralisation de l'algorithme de tournées de véhicules basé sur les économies afin de déterminer les fréquences de passage des autobus. Chien, Yang et Hou (2001) étudient également un problème similaire de design d'un réseau de routes d'autobus afin d'optimiser l'accès à un point de transfert intermodal; ils utilisent une adaptation de l'algorithme génétique.

4. Minimisation du kilométrage à vide

Nous allons formuler le problème de minimisation du kilométrage à vide en terme de courses. Une course est un trajet qui partant d'un entrepôt se dirige vers un terminus, comprend un ou plusieurs allers-retours sur un ou plusieurs parcours et se termine par une sortie d'un terminus pour revenir vers un entrepôt. Le kilométrage à vide associé à une course correspond donc à la distance entre le ou les entrepôts et le ou les terminus associés à la course. Dans le cas de l'exemple de la Figure 2, la course 1024 débute au terminus 8 (distance à vide 14,2 Km) et se termine au terminus 51 (distance à vide 6,1 Km) pour une distance à vide totale de 20,3 kilomètres. Dans ce qui suit nous proposons deux modèles, un premier qui oblige chaque autobus à revenir à son entrepôt de départ et un second qui relaxe cette hypothèse et permet de débiter et de terminer une course à des entrepôts différents.

Premier modèle

Le premier modèle permet d'assigner les courses aux entrepôts en imposant que chaque autobus parte et revienne au même entrepôt. Le modèle tient compte de la capacité des entrepôts en tout temps en découpant la journée en T périodes de temps. Le modèle est le suivant.

Indices

i : entrepôt ($i = 1, \dots, m$)

j : course ($j = 1, \dots, n$)

t : période ($t = 1, \dots, T$)

Paramètres

d_{ij} : kilométrage à vide (sortie et retour) de la course j par rapport à l'entrepôt i ;

c_i : capacité de l'entrepôt i ;

A : nombre total d'autobus disponible (pour les m entrepôts);

S_t : ensemble des courses qui partent à la période t ;

R_t : ensemble des courses qui retournent à la période t .

Variables de décision

x_{ij} : variable binaire égale à 1 si la course j est effectuée à l'entrepôt i , 0 autrement;

n_{it} : nombre d'autobus à l'entrepôt i au début de la période t .

Fonction objectif

$$\text{Minimiser : } \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n d_{ij} x_{ij} \quad (1)$$

Contraintes :

$$\sum_{i=1}^m x_{ij} = 1 \quad (j = 1, \dots, n) \quad (2)$$

$$n_{it} = n_{i,t-1} - \sum_{j \in S_{t-1}} x_{ij} + \sum_{j \in R_{t-1}} x_{ij} \quad (i = 1, \dots, m); (t = 2, \dots, T) \quad (3)$$

$$n_{it} \leq c_i \quad (i = 1, \dots, m); (t = 1, \dots, T) \quad (4)$$

$$\sum_{i=1}^m n_{i1} = A \quad (5)$$

$$n_{i1} = n_{iT+1} \quad (i = 1, \dots, m) \quad (6)$$

$$x_{ij} = 0 \text{ ou } 1 \quad (i = 1, \dots, m); (j = 1, \dots, n) \quad (7)$$

La fonction objectif minimise simplement le kilométrage à vide des courses en fonction de l'entrepôt auxquelles elles sont affectées. La contrainte (2) permet de s'assurer que chaque course est affectée à un et un seul entrepôt. La contrainte (3) comptabilise exactement le nombre d'autobus se trouvant à chaque entrepôt i au début de chaque période t en tenant compte des courses qui quittent durant la période t (ensemble S_t) et de celles qui reviennent (ensemble R_t). La contrainte (4) garantit qu'à chaque période t le nombre d'autobus se trouvant à chaque entrepôt i ne dépasse pas sa capacité c_i . Nous devons aussi nous assurer que le nombre total d'autobus disponible au début de la journée est respecté (contrainte 5) et que le nombre d'autobus en début et en fin de journée est le même pour chaque entrepôt (contrainte 6). Il est important de mentionner que la contrainte (3) joue également un rôle important pour la faisabilité pratique de la solution en tenant une comptabilité des retours et des sorties de véhicules dans le temps. Ainsi, pour un nombre donné de courses, le modèle utilisera le nombre exact de véhicules.

Deuxième modèle

Le deuxième modèle diffère du premier par le fait qu'il permet aux courses de retourner à un entrepôt différent de leur entrepôt de départ.

Indices

i : entrepôt ($i = 1, \dots, m$)

j : course ($j = 1, \dots, n$)

t : période ($t = 1, \dots, T$)

Paramètres

e_{ij} : kilométrage à vide (sortie) pour la course j à partir de l'entrepôt i ;

f_{ij} : kilométrage à vide (retour) pour la course j vers l'entrepôt i ;

c_i : capacité de l'entrepôt i ;

A : nombre total d'autobus disponible (pour les m entrepôts);

S_t : ensemble des courses qui partent à la période t ;

R_t : ensemble des courses qui retournent à la période t .

Variables de décision

x_{ij} : variable binaire égale à 1 si la sortie de la course j est effectuée à partir de l'entrepôt i , 0 autrement;

y_{ij} : variable binaire égale à 1 si le retour de la course j est effectué vers l'entrepôt i , 0 autrement;

n_{it} : nombre d'autobus à l'entrepôt i au début de la période t .

Fonction objectif

$$\text{Minimiser : } \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n e_{ij} x_{ij} + \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n f_{ij} y_{ij} \quad (8)$$

Contraintes

$$\sum_{i=1}^m x_{ij} = 1 \quad (j = 1, \dots, n) \quad (9)$$

$$\sum_{i=1}^m y_{ij} = 1 \quad (j = 1, \dots, n) \quad (10)$$

$$n_{it} = n_{i,t-1} - \sum_{j \in S_{t-1}} x_{ij} + \sum_{j \in R_{t-1}} y_{ij} \quad (i = 1, \dots, m); (t = 2, \dots, T) \quad (11)$$

$$n_{it} \leq c_i \quad (i = 1, \dots, m); (t = 1, \dots, T) \quad (12)$$

$$\sum_{i=1}^m n_{i1} = A \quad (13)$$

$$n_{i1} = n_{iT+1} \quad (i = 1, \dots, n) \quad (14)$$

$$X_{ij} = 0 \text{ ou } 1 \quad (i = 1, \dots, m) ; (j = 1, \dots, n) \quad (15)$$

$$Y_{ij} = 0 \text{ ou } 1 \quad (i = 1, \dots, m) ; (j = 1, \dots, n) \quad (16)$$

La fonction objectif (8) comptabilise séparément le kilométrage à vide des courses qui quittent et qui reviennent aux entrepôts. La contrainte (9) assigne à chaque course un seul entrepôt de sortie. De même, la contrainte (10) assigne à chaque course un seul entrepôt de retour. La contrainte (11) permet de compter le nombre d'autobus se trouvant à chaque entrepôt i au début de chaque période t . La contrainte (12) assure que pour chaque entrepôt i , le nombre de véhicules ne doit pas être supérieur à la capacité c_i pour chaque période de l'horizon de planification. Nous devons aussi nous assurer que le nombre total d'autobus du réseau est respecté (contrainte 13) et que le nombre de véhicules en début et en fin de journée est le même pour chaque entrepôt (contrainte 14) si l'on désire que l'horaire soit réalisable d'un jour à l'autre.

Les deux modèles font l'hypothèse que le départ et le retour de chaque autobus se fait dans deux périodes différentes. En cas contraire, si les périodes étaient trop longues, le calcul exact du nombre d'autobus en tout temps à chaque entrepôt pourrait être faussé. Ce problème peut facilement être évité en fixant la longueur des périodes de temps à une durée inférieure à la durée de la plus courte course. Finalement, le début de la première période doit précéder le départ de la première course de la journée.

5. Application aux données du Réseau de Transport de la Capitale

Dans cette section nous montrons comment les modèles développés ont été appliqués aux données réelles du Réseau de Transport de la Capitale afin de permettre de sélectionner un ou plusieurs des sites potentiels pour l'ouverture d'un nouvel entrepôt. À l'aide de ces modèles, nous sommes en mesure d'estimer le kilométrage à vide des divers scénarios envisagés et ainsi identifier le scénario le plus profitable.

Dans un premier temps nous présentons les sites potentiels et les divers coûts pertinents. Nous appliquons ensuite les modèles développés aux données du RTC et effectuons une analyse financière des divers scénarios étudiés. Finalement, l'impact du scénario sélectionné sur la congestion routière sera discuté.

Sites candidats

La localisation d'un ou de plusieurs nouveaux entrepôts pour un réseau de transport comme le RTC nécessite une analyse approfondie des sites potentiels. Compte tenu de la superficie des terrains disponibles (seulement 14 terrains vacants sur le territoire de la ville de Québec rencontraient la superficie minimale de 20 000 mètres carrés), de leur proximité des axes routiers majeurs et de leur zonage, le nombre de sites potentiels est relativement limité. Le RTC a finalement identifié trois sites potentiels. La valeur des terrains de ces sites a été évaluée par le centre de développement économique et urbain de la ville de Québec (2002). Les sites retenus sont les suivants :

- 1- Site Carillon : Situé dans le parc industriel Carillon et d'une superficie de 29 300 m². Le coût d'achat du terrain de ce site est de 215 000 \$.
- 2- Site Jean-Talon Nord : Situé dans le parc industriel Jean-Talon Nord et d'une superficie de 28 500 m². Le coût d'achat est de 1 180 000 \$.
- 3- Site des Carrières : Situé dans le parc industriel des Carrières et d'une superficie totale de 22 000 m². Le coût d'achat est de 77 500 \$.

Nous avons commencé par évaluer intuitivement l'intérêt de ces sites en identifiant les terminus les plus importants du réseau. À l'aide des 13 parcours hebdomadaires les plus importants (représentant 65% du nombre d'aller-retour sur le réseau) nous avons calculé le nombre de sorties et de retours pour chaque terminus utilisé. La Figure 3 illustre la densité des départs et des retours sur les terminus du réseau ainsi que la localisation des trois sites candidats. La grosseur des ronds est proportionnelle au nombre d'aller-retour pour chaque terminus. Lorsque nous regardons cette carte, nous pouvons remarquer qu'il y a deux zones où la demande est élevée. Premièrement, à Ste-Foy près du pont de Québec et du pont Pierre Laporte (en bas et à gauche sur la figure). Deuxièmement, il y a aussi une densité élevée dans le centre ville de

Québec (au milieu et à droite sur la figure). Intuitivement, les sites potentiels 1 et 2 (sites Carillon et Jean-Talon) semblent donc les plus intéressants du point de vue de leur proximité des terminus les plus achalandés.

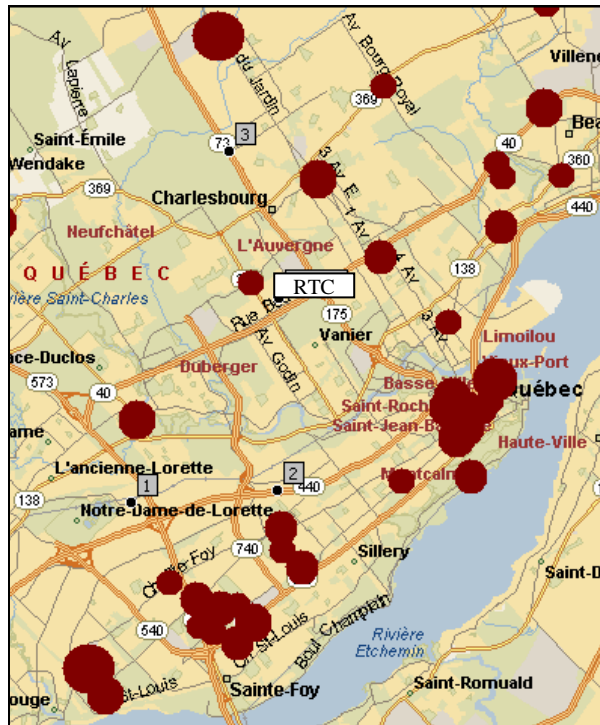


Figure 3
Localisation des sites candidats

Coûts pertinents

Aux coûts fixes et variables associés à l'ouverture d'un nouvel entrepôt s'ajoutent les coûts d'opérations récurrents pour son exploitation. Les coûts fixes correspondent au coût du terrain, au coût de construction du bâtiment des services administratifs et au coût des équipements requis. Les coûts variables dépendent de la capacité de l'entrepôt et sont calculés en considérant un espace d'entreposage de 53,5 m² pour chaque autobus. Ces coûts ont été déterminés en concertation avec les responsables du RTC. En résumé, les coûts pertinents sont les suivants :

Coûts fixes :

Terrains :	selon le site choisi
Coûts des équipements :	860 000 \$
Coûts de construction (services administratifs) :	2 580 000 \$

Coûts variables :

Coûts de construction (par véhicules) :

$$53,5 \text{ m}^2/\text{véhicule} \times 1\,040,72 \text{ \$/m}^2 = 55\,680 \text{ \$/véhicule}$$

Coûts de construction additionnels si plus de 100 véhicules 25 810 \$/véhicule

Coûts annuels récurrents :

Coûts d'opérations de l'entrepôt 507 525 \$/an

Coûts d'opérations additionnels si plus de 100 véhicules : 5 075 \$/véhicule

Afin d'estimer le coût du kilométrage à vide nous avons évalué conjointement avec le RTC le coût d'utilisation moyen d'un véhicule par kilomètre. En considérant que la vitesse moyenne d'un autobus est de 20 Km/heure, que le coût d'utilisation du véhicule est de 20 \$/heure additionnée au coût de main d'œuvre de 50 \$/heure (comprenant salaire, formation, habillement, etc.), on obtient un coût de 3,50\$ par kilomètre parcouru. Ces données ont été validées par les responsables du Réseau de Transport de la Capitale.

Résultats numériques

Les deux modèles développés ont été appliqués aux données RTC. Nous avons donc modélisé les 178 terminus du réseau et les 623 courses quotidiennes avec leurs terminus associés et leurs heures précises de départ et d'arrivée. Toutes les coordonnées des terminus, de l'entrepôt actuel et des trois entrepôts potentiels ont été géocodées avec précision et enregistrées dans une base de donnée *Acces*. Tous les traitements sont effectués par le biais d'une interface conviviale développée en *Visual Basic* et utilisant le logiciel *EZMOD* pour la génération des modèles. Toutes les distances ont été calculées à l'aide du logiciel *Microsoft MapPoint 2002* sous le critère de la distance la plus courte. Tous les modèles ont été résolus à l'aide de *Cplex 8.0*. Bien que le nombre de variables soit élevé, près de 2 700 pour le premier modèle et jusqu'à 5 200 pour le deuxième, tous les modèles ont été résolus en moins d'une seconde sur un ordinateur IBM 1,3Ghz avec 1,8 GRAM.

La durée de la plus petite course est de 53 minutes. Nous avons donc divisé la journée en 48 périodes de 30 minutes. Cette décomposition nous assure qu'il n'y a aucune course qui parte et revienne durant la même période. De plus, la première course de la journée doit arriver à son

terminus de départ à 5h21 du matin. Compte tenu de la distance, le premier véhicule doit quitter l'entrepôt actuel à 5h03. Nous avons donc décidé de faire débiter la première période du modèle à 5h00.

À l'aide des modèles développés, nous avons analysé toutes les combinaisons d'entrepôts ce qui donne les scénarios suivants :

- A. Site actuel seulement ;
- B. Site actuel + Site Jean-Talon Nord ;
- C. Site actuel + Site Carillon ;
- D. Site actuel + Site des Carrières ;
- E. Site actuel + Site Jean-Talon Nord + Site Carillon ;
- F. Site actuel + Site Jean-Talon Nord + Site des Carrières ;
- G. Site actuel + Site Carillon + Site des Carrières ;
- H. Tous les sites (actuel, Carillon, Jean-Talon Nord et Carrières).

Dans un premier temps, nous avons analysés les scénarios à l'aide du premier modèle car il correspond à la politique la plus simple pour l'affectation des autobus aux entrepôts, c'est-à-dire que chaque autobus revient au même entrepôt de départ. En utilisant le premier modèle et un seul entrepôt qui est l'entrepôt existant, nous reproduisons la situation actuelle. Ainsi nous obtenons une solution dont le kilométrage à vide est de 3 508 358 Km et qui nécessite une capacité d'entreposage de 344 autobus. Ce résultat a été validé par les responsables du RTC. Le Tableau 1 présente les résultats de ce scénario (scénario A) et de chacun des sept autres scénarios.

Les économies d'opérations annuelles sont calculées de la façon suivante : (kilométrage à vide actuel – kilométrage à vide du scénario) \times 3,5 \$/Km – coûts d'opérations annuels des entrepôts à créer. À titre d'exemple, les économie d'opérations annuelles du scénario *H* sont calculées comme suit : $(3\ 508\ 358 - 2\ 919\ 855) \times 3,5 - (3 \times 507\ 525) = 537\ 186$ \$.

Tableau 1
Kilométrage à vide, capacité d'entreposage et économies d'opérations
selon le premier modèle

Scénario	Km à vide	Capacités nécessaires (véhicules)				Économies annuelles (\$)
		RTC	Jean-Talon	Carillon	Carrières	
A	3 508 358	344				-
B	3 229 568	246	97			468 242
C	3 106 288	242		107		864 196
D	3 354 662	240			101	25 337
E	3 069 283	226	32	87		521 713
F	3 077 302	150	97		97	493 649
G	2 956 375	146		104	97	896 592
H	2 919 855	131	32	85	97	537 186

Afin de compléter notre analyse, nous devons prendre en considération les coûts d'investissement pour la construction des nouveaux entrepôts (achat du terrain et construction de nouvelles bâtisses). Le Tableau 2 présente ces coûts ainsi que la durée de la période de remboursement actualisée, c'est-à-dire le nombre d'années nécessaires pour récupérer les investissements à l'aide des économies annuelles actualisées. Les économies annuelles ont été actualisées à un taux de 6 %. Ce taux correspond au taux d'intérêt utilisé par le RTC pour le calcul du financement (Budget 2003 du Réseau de Transport de la Capitale, p. 12). Nous considérons également que les terrains conservent une valeur résiduelle égale à leur valeur d'acquisition.

Tableau 2
Coûts d'investissement et période de remboursement actualisée selon le premier modèle

Scénario	Coûts d'investissement (\$)			Période de remboursement actualisée (années)
	Jean-Talon	Carillon	Carrières	
B	10 020 960	-	-	> 50
C	-	9 793 430	-	18,77
D	-	-	9 166 990	> 50
E	6 401 760	8 499 160	-	> 50
F	10 020 960	-	8 918 460	> 50
G	-	9 548 960	8 918 460	> 50
H	6 401 760	8 387 800	8 918 460	> 50

Le scénario C est le seul où les coûts d'investissement peuvent être remboursés dans un délai inférieur à 20 ans. Après 18,77 années d'exploitation, l'investissement dans un entrepôt d'une capacité de 107 véhicules sera rentabilisé. Donc si le RTC ouvre un nouvel entrepôt dans le parc

Carillon, il lui procurera des économies dont la valeur actualisée est d'environ 10 millions \$ en 19 ans, ce qui est supérieur aux coûts d'investissement.

Il pourrait s'avérer intéressant d'analyser le scénario C avec une capacité inférieure à 107 autobus. Cela pourrait nous permettre de rentabiliser plus rapidement cet investissement. En effet, il est possible que la diminution des coûts de construction engendrée par la diminution de la capacité soit relativement plus importante que les économies. Le Tableau 3 analyse la possibilité de diminuer la capacité à 100, 90, 80 et 70 véhicules. On remarque que le scénario C avec une capacité de 80 autobus est celui qui procure la période de remboursement actualisée la plus courte puisque le projet se rentabilise sur 14,39 années.

Tableau 3
Période de remboursement actualisée du scénario C avec des différentes capacités selon le premier modèle

Économie (\$)	Capacité	Coûts totaux (\$)	Période de remboursement actualisée (années)
864 196	107	9 793 430	18,77
898 047	100	9 223 000	15,80
881 650	90	8 666 200	14,69
834 135	80	8 109 400	14,39
771 448	70	7 552 600	14,51

L'application du deuxième modèle donne les résultats présentés au Tableau 4. Le tableau montre qu'en permettant aux autobus de revenir à l'entrepôt de départ ou à un entrepôt différent de celui de départ, nous pouvons réduire sensiblement le kilométrage à vide et ainsi obtenir des économies plus élevées. Le tableau montre à nouveau que le scénario C permet les économies d'opérations annuelles les plus importantes à 1 743 133 \$. Les modèles confirment donc le choix intuitif du site Carillon présenté précédemment à la Figure 3. Le Tableau 5 présente les coûts d'investissement pour les sept scénarios évalués et montre que le scénario C est celui qui offre la période de remboursement actualisée la plus courte.

Tableau 4

Kilométrage à vide, capacité d'entreposage et économies d'opérations selon le deuxième modèle

Scénario	Km à vide	Capacités nécessaires (véhicules)				Économies annuelles (\$)
		RTC	Jean-Talon	Carillon	Carrières	
A	3 508 358	344				-
B	3 033 914	233	119			1 056 605
C	2 824 713	216		128		1 743 133
D	3 199 235	211			133	406 932
E	2 768 453	203	36	114		1 503 571
F	2 726 451	100	113		133	1 488 177
G	2 530 434	100		120	121	2 199 610
H	2 476 946	92	36	103	120	1 970 642

Tableau 5

Coûts d'investissement et période de remboursement actualisée selon le deuxième modèle

Scénario	Coûts d'investissement (\$)			Période de remboursement actualisée (années)
	Jean-Talon	Carillon	Carrières	
B	11 736 310	-	-	15,86
C	-	11 504 720	-	8,44
D	-	-	11 774 670	> 50
E	6 624 480	10 363 860	-	16,70
F	11 247 370	-	11 774 670	36,04
G	-	10 852 800	10 796 790	14,99
H	6 624 480	9 467 470	10 715 300	25,32

Le Tableau 6 résume les économies réalisables pour le scénario C avec différentes capacités d'entreposage. Les résultats démontrent que, toujours en utilisant un taux d'actualisation de 6 %, nous pourrions rentabiliser un entrepôt de 90 autobus situé dans le parc Carillon en 6,07 ans.

Tableau 6

Période de remboursement actualisée du scénario C avec des différentes capacités selon le deuxième modèle

Économie (\$)	Capacité	Coûts totaux (\$)	Période de remboursement actualisée (années)
1 743 133	128	11 774 670	8,44
1 796 829	100	9 223 000	6,14
1 702 250	90	8 666 200	6,07
1 578 218	80	8 109 400	6,12
1 452 877	70	7 552 600	6,20

Les résultats précédents démontrent clairement l'intérêt, dans le contexte où plusieurs entrepôts sont utilisés, de permettre aux autobus de partir d'un entrepôt et de revenir à un entrepôt

différent. On peut craindre que les avantages évidents de cette politique au niveau de la réduction du kilométrage à vide soient amoindris par l'augmentation de la complexité de gestion qui en découlera. En effet, il faudra alors envisager la possibilité que certains chauffeurs ayant débuté leur journée de travail à un entrepôt terminent celle-ci à un autre. Toutefois, on note que dans l'état actuel des choses, plusieurs chauffeurs débutent ou terminent leur journée de travail au milieu d'une course. Par conséquent, leur point de début de la journée de travail diffère de celui de fin. Le RTC utilise des navettes pour ramener ces chauffeurs pour qu'ils puissent récupérer leur véhicule personnel. L'impact réel serait donc mineur.

Impact sur la congestion routière

Un des objectifs reliés à l'ouverture d'un nouvel entrepôt consistait à alléger le trafic aux alentours de l'entrepôt actuel et ainsi aider à atteindre la mission du RTC qui vise à contribuer à un aménagement urbain de qualité. Le Tableau 7 compare la situation actuelle à celle du scénario C avec une capacité de 80 véhicules dans le cas où la politique de retour à l'entrepôt de départ est appliquée (les résultats du premier modèle). Le Tableau 7 présente les entrées et sorties d'autobus aux divers entrepôts pour chaque tranche de 30 minutes. On y voit que, dans la situation actuelle, c'est entre 7h00 et 7h30 qu'il y a le plus de sorties avec 103 suivie de 16h00 à 16h30 avec 85 sorties. Si le scénario C est implanté, le nombre de sorties se réduit respectivement de 103 et 85 à 74 et 54. Cela correspond à 29 sorties de moins entre 7h00 et 7h30 et à 31 sorties de moins entre 16h00 et 16h30, soit près d'un autobus de moins à la minute ce qui est considérable. Évidemment cet achalandage est transféré vers le nouvel entrepôt. Des gains similaires peuvent être notés également pour les retours des autobus.

Le Tableau 8 effectue la même analyse mais pour le deuxième modèle et un entrepôt de 90 véhicules. Dans ce cas, la réduction est encore plus importante, le nombre de sorties entre 7h00 et 7h30 passant de 103 à 70. Entre 16h00 et 16h30 la réduction est plus accentuée soit de 85 à 39, une réduction de 46 sorties en 30 minutes.

6. Conclusion

Dans cet article nous avons développé deux modèles permettant de résoudre le problème de minimisation du kilométrage à vide. Nous les avons appliqués aux données réelles du Réseau de Transport de la Capitale de la ville de Québec, le RTC. Les résultats montrent que le RTC pourrait réaliser des économies importantes en implantant un nouvel entrepôt. Le kilométrage à vide annuel avec l'entrepôt actuel est de 3 508 358 Km tandis que l'ouverture d'un entrepôt sur le site Carillon permettrait de le réduire à 3 106 288 Km (premier modèle) et à 2 824 713 Km (deuxième modèle).

Le scénario qui permet de récupérer les coûts d'investissement le plus rapidement consiste à ouvrir un entrepôt d'une capacité de 90 véhicules sur le site Carillon et de permettre à certains autobus de partir d'un entrepôt et de revenir à un autre. Selon ce scénario, les coûts d'investissement de 8 666 200 \$ sont récupérés en 6,07 années.

Remerciements

Cette recherche a été partiellement financée par les subventions OGP0036509 et OGP0172633 du Conseil de Recherche en Sciences Naturelles et en Génie du Canada (CRSNG) que nous remercions. Nous tenons aussi à remercier M. Paul André Robert du Réseau de Transport de la Capitale pour son intérêt et sa collaboration envers ce projet.

Tableau 7

Sorties et retours d'autobus dans le cas de retour à l'entrepôt de départ (premier modèle)

Plage horaire	Situation actuelle		Situation avec un deuxième entrepôt (Scénario C avec capacité de 80)			
	Entrepôt actuel		Entrepôt actuel		Entrepôt Carillon	
	Sorties	Retours	Sorties	Retours	Sorties	Retours
05h00 : 05h30	12	0	13	0	0	0
05h30 : 06h00	29	0	20	0	8	0
06h00 : 06h30	38	0	34	0	10	0
06h30 : 07h00	78	0	66	0	22	0
07h00 : 07h30	103	0	74	0	26	0
07h30 : 8h00	46	0	30	0	11	0
08h00 : 08h30	18	0	7	0	3	0
08h30 : 09h00	0	6	0	1	0	5
09h00 : 09h30	0	65	0	50	0	14
09h30 : 10h00	0	90	0	75	0	26
10h00 : 10h30	0	40	0	18	0	12
10h30 : 11h00	1	4	0	4	1	0
11h00 : 11h30	3	0	3	0	1	0
11h30 : 12h00	35	0	20	0	15	0
12h00 : 12h30	12	0	7	0	5	0
12h30 : 13h00	7	0	1	0	5	0
13h00 : 13h30	0	4	0	4	0	2
13h30 : 14h00	0	20	0	4	0	10
14h00 : 14h30	0	30	0	18	0	16
14h30 : 15h00	3	2	4	1	0	1
15h00 : 15h30	32	0	26	0	8	0
15h30 : 16h00	81	0	63	0	16	0
16h00 : 16h30	85	0	54	0	30	0
16h30 : 17h00	22	0	17	0	5	0
17h00 : 17h30	2	13	2	6	0	4
17h30 : 18h00	2	16	0	11	2	4
18h00 : 18h30	2	42	1	27	1	6
18h30 : 19h00	0	69	0	58	0	19
19h00 : 19h30	0	70	0	58	0	14
19h30 : 20h00	0	44	0	31	0	12
20h00 : 20h30	0	14	0	16	0	1
20h30 : 21h00	2	0	2	1	0	0
21h00 : 21h30	5	1	4	1	2	0
21h30 : 22h00	2	0	1	0	0	0
22h00 : 22h30	0	1	1	1	0	0
22h30 : 23h00	2	4	2	0	0	1
23h00 : 23h30	1	5	0	6	0	1
23h30 : 24h00	0	11	0	9	0	2
24h00 : 00h30	0	5	0	3	0	1
00h30 : 01h00	0	3	0	3	0	0
01h00 : 01h30	0	10	0	9	0	1
01h30 : 02h00	0	20	0	11	0	8
02h00 : 02h30	0	20	0	18	0	10
02h30 : 03h00	0	14	0	7	0	1
03h00 : 03h30	0	0	0	1	0	0

Tableau 8

Sorties et retours d'autobus dans le cas de retour à l'entrepôt de départ ou à un entrepôt différent (deuxième modèle)

Plage horaire	Situation actuelle		Situation avec un deuxième entrepôt (Scénario C et capacité de 90)			
	Entrepôt actuel		Entrepôt actuel		Nouvel entrepôt	
	Sorties	Retours	Sorties	Retours	Sorties	Retours
05h00 : 05h30	12	0	11	0	2	0
05h30 : 06h00	29	0	20	0	8	0
06h00 : 06h30	38	0	30	0	14	0
06h30 : 07h00	78	0	61	0	27	0
07h00 : 07h30	103	0	70	0	30	0
07h30 : 8h00	46	0	33	0	8	0
08h00 : 08h30	18	0	9	0	1	0
08h30 : 09h00	0	6	0	1	0	5
09h00 : 09h30	0	65	0	38	0	26
09h30 : 10h00	0	90	0	54	0	47
10h00 : 10h30	0	40	0	18	0	12
10h30 : 11h00	1	4	0	3	1	1
11h00 : 11h30	3	0	4	0	0	0
11h30 : 12h00	35	0	16	0	19	0
12h00 : 12h30	12	0	5	0	7	0
12h30 : 13h00	7	0	2	0	4	0
13h00 : 13h30	0	4	0	4	0	2
13h30 : 14h00	0	20	0	4	0	10
14h00 : 14h30	0	30	0	17	0	17
14h30 : 15h00	3	2	4	1	0	1
15h00 : 15h30	32	0	20	0	14	0
15h30 : 16h00	81	0	57	0	22	0
16h00 : 16h30	85	0	39	0	45	0
16h30 : 17h00	22	0	13	0	9	0
17h00 : 17h30	2	13	0	8	2	2
17h30 : 18h00	2	16	0	13	2	2
18h00 : 18h30	2	42	0	25	2	8
18h30 : 19h00	0	69	0	55	0	22
19h00 : 19h30	0	70	0	54	0	18
19h30 : 20h00	0	44	0	30	0	13
20h00 : 20h30	0	14	0	15	0	2
20h30 : 21h00	2	0	0	1	0	0
21h00 : 21h30	5	1	2	1	4	0
21h30 : 22h00	2	0	1	0	0	0
22h00 : 22h30	0	1	1	1	0	0
22h30 : 23h00	2	4	2	0	0	1
23h00 : 23h30	1	5	0	5	0	2
23h30 : 24h00	0	11	0	9	0	2
24h00 : 00h30	0	5	0	3	0	1
00h30 : 01h00	0	3	0	3	0	0
01h00 : 01h30	0	10	0	7	0	3
01h30 : 02h00	0	20	0	10	0	9
02h00 : 02h30	0	20	0	15	0	13
02h30 : 03h00	0	14	0	6	0	2
03h00 : 03h30	0	0	0	1	0	0

Références

- Ball M., Bodin L. et Dial R. (1983), A matching based heuristic for scheduling mass transit crews and vehicles. *Transportation Science*, 17, 4-31.
- Bouzaïene-Ayari B., Gendreau M. et Nguyen S. (2001), Modeling bus stops in transit networks: A survey and new formulations, *Transportation Science*, 35, 304-321.
- Budget 2003, Réseau de Transport de la Capitale, Adopté le 19 décembre 2002.
- Ceder A., Golany B. et Tal O. (2001), Creating bus timetables with maximal synchronization. *Transportation Research A*, 35, 913-928.
- Centre de développement économique et urbain de la ville de Québec, Rapport sur la valeur des terrains vacants entre 20 000 et 30 000 m.c. dans les zones ou parcs industriels de la ville de Québec. Fichier des propriétés, juillet 2002.
- Chien S., Yang Z. et Hou E. (2001), Genetic algorithm approach for transit route planning and design. *Journal of Transportation Engineering*, May/June, 2001, 200-207.
- Daduna J. R. et Mojsilovic M. (1988), Computer-aided vehicle and duty scheduling using HOT program system, in J. R. daduna and A. Wren (eds.) *Computer-Aided Transit Scheduling*, Springer-Verlag, 133-146.
- Ferreira, J. V. et Guimarães R. C. (1995), A travelling salesman model for the sequencing of duties in bus crew rotas, *Journal of the Operational Research Society*, 46, 4, 415-426.
- Haase K., Desaulniers G. et Desrosiers J. (2001), Simultaneous vehicle and crew scheduling in urban mass transit systems. *Transportation Science*, 35, 286-303.
- Haghani A., Banihashemi M. et Chiang K.-H (2003), A comparative analysis of bus transit vehicle scheduling models. *Transportation Research, Part B*, 37, 301-322.
- Kasana H.S. et Kumar K.D. (2000), An efficient algorithm for multiobjective transportation problems, *Asia-Pacific Journal of Operational Research*, 17, 27-40.
- Kuah G. K. et Perl J. (1988), Optimization of feeder bus routes and bus-stop spacing. *Journal of Transportation Engineering*, 114, 3, 341-354.
- Kuan G. K. et Perl J. (1989), The feeder-bus network-design problem. *Journal of the Operational Research Society*, 40, 8, 651-767.
- Lourenço H.R., Paixão J. P. et Portugal R. (2001), Multiobjective metaheuristics for the bus driver scheduling problem, *Transportation Science*, 35, 331-343.

- Paías A. et Paixão J. (1993), State space relaxation for set covering problems related to bus driver scheduling, *European Journal of Operational Research*, 71, 2, 303-316.
- Pattnaik S. B., Mohan S. et Tom V. M. (1998), Urban bus transit route network design using genetic algorithm. *Journal of Transportation Engineering*, 124, 368-375.
- Prakash S., Balaji B. et Tuteja D. (1999), Optimizing dead mileage in urban bus routes through a non-dominated solution approach, *European Journal of Operational Research*, 114, 465-473.
- Rousseau, J. M., Lessard, R. et Blais J. Y. (1985), Enhancements to the HASTUS crew scheduling algorithm. J. M. Rousseau, ed. *Computer Scheduling of Public Transport-2*. North-Holland, 295-310.
- Sinclair, M. et van Oudheusden, D. (1997), A network approach to trip frequency scheduling for bus routes in heavily congested cities, *European Journal of Operational Research*, 103, 1, 18-27.
- Smith, B. et Wren A. (1988), A bus driver scheduling system using a set covering formulation. *Transportation Science*, 22A, 97-108.
- Valoux C. et Housos E. (2002), Combined bus and driver scheduling. *Computers & Operations Research*, 29, 243-259.
- van Oudheusden D. L. et Zhu, W. (1995), Trip frequency scheduling for bus route management in Bangkok, *European Journal of Operational Research*, 83, 3, 439-451.

Sites web consultés

- Réseau de Transport de la Capitale, <http://www.stcuq.qc.ca/>, en date de 14/3/2003.
- Statistiques Canada, <http://www.statcan.ca>, Le Quotidien, jeudi le 4 octobre 2001, en date de 14/3/2003.