

2968.

CHOIX DE SITES D'ENTREPÔTS POUR LES AUTOBUS DE TRANSPORT URBAIN : LE CAS DU RÉSEAU DE TRANSPORT DE LA CAPITALE

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

Courriels : Fayez.Bocctor@fsa.ulaval.ca; Jacques.Renaud@fsa.ulaval.ca; Sebastien.Bournival@centor.ulaval.ca

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

²*Faculté des Sciences de l'administration, Pavillon Palasis-Prince, Université Laval, Québec, Canada G1K 7P4*

Résumé

Cet article étudie le problème du choix de sites d'entrepôts pour les autobus en transport urbain. L'objectif visé est de minimiser la durée de récupération de l'investissement. Une analyse financière permet d'évaluer la profitabilité de différents scénarios d'ouverture d'entrepôts. Deux modèles de programmation linéaire sont proposés afin de minimiser le kilométrage à vide parcouru par les autobus pour un ensemble d'entrepôts donné. Les modèles ont été utilisés dans le cadre d'une étude pour le *Réseau de Transport de la Capitale* de la ville de Québec. Les résultats obtenus permettent d'identifier les localisations les plus intéressantes et démontrent que des réductions importantes du kilométrage 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'investissement relié à l'ouverture du nouvel entrepôt en 6 années. Finalement, l'impact de cet entrepôt additionnel sur la congestion des routes d'accès est également analysé.

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

1. Introduction

Cet article évalue l'impact financier associé à divers scénarios d'ouverture de nouveaux entrepôts pour les autobus du réseau de transport en commun de la ville de Québec, appelée le *Réseau de Transport de la Capitale* (RTC). 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 lignes 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 rentrées d'autobus 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, ...).

Si il est impossible d'éliminer les engorgements de la circulation sur le réseau, il est cependant possible de les contourner en localisant judicieusement les entrepôts d'autobus en divers points du réseau routier. C'est dans cette optique que cet article propose et étudie l'impact de divers scénarios d'ouverture d'entrepôts. Pour évaluer l'impact de chaque scénario, nous proposons deux modèles permettant de minimiser les déplacements à vide associés aux sorties et aux rentrées des autobus de la flotte. Une analyse financière permet de sélectionner le scénario minimisant la durée de récupération de l'investissement associé aux divers entrepôts à ouvrir.

Définissons maintenant la terminologie qui sera utilisée dans cet article. Le réseau sur lequel circulent les autobus du RTC est composé d'un ensemble de *lignes* (ou parcours) d'autobus. Un *trajet* (ou voyage) correspond à un déplacement d'autobus le long d'une ligne selon un horaire déterminé. Une *course* correspond à une séquence de trajets et de déplacements à vide entre ces trajets qui doit être effectuée par un seul autobus. On suppose que l'autobus affecté à une telle course provient d'un entrepôt lorsqu'il débute cette course et qu'il retourne à un entrepôt immédiatement après. Le déplacement à vide d'un autobus d'un entrepôt vers le début d'une course s'appelle une *sortie d'autobus (pull-out trip)* tandis que celui de la fin d'une course vers un entrepôt est appelé une *rentrée d'autobus (pull-in trip)*. La combinaison d'une sortie, d'une course et d'une rentrée donne un *horaire d'autobus*.

Les principales contributions de cet article sont les suivantes. Dans un premier temps, nous présentons deux modèles multi-périodes permettant d'allouer les autobus aux divers entrepôts afin de minimiser le kilométrage à vide associé aux sorties et rentrées d'autobus. 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 par scénarios permettant de sélectionner les localisations qui minimisent la durée de récupération des investissements. Troisièmement, à l'aide des modèles développés, nous soulignons l'impact de l'ouverture de l'entrepôt sélectionné sur la réduction du trafic sur les routes d'accès aux entrepôts. Finalement, toutes ces analyses sont appliquées aux 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 un bref survol de la littérature relative à la gestion du transport urbain. Les modèles proposés sont développés à la Section 4. La Section 5 applique ces modèles aux données du RTC 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 privées de transport. 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* (RTC), dénomination qu'elle utilise actuellement.

Le RTC possède une flotte de 508 autobus répartis sur 91 lignes distinctes et compte sur des effectifs de 1 205 employés dont 720 chauffeurs. Bien que le RTC ait déjà possédé des autobus articulés, leur utilisation a été délaissée au cours des années. Actuellement le RTC utilise une flotte relativement homogène d'autobus et il n'y a aucune contrainte limitant l'affectation d'un autobus à une ligne. 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 problème de planification en transport public (*public transit*) consiste à offrir à une population donnée un service de qualité qui permet aux passagers de voyager à un coût raisonnable. Pour ce faire, les agences de transport doivent gérer plusieurs ressources (autobus, employés, dépôts, ...) et prendre plusieurs décisions importantes (conception du réseau et des

lignes, détermination des fréquences, construction des horaires des autobus, ...). Puisqu'il est clairement impossible de résoudre ce problème dans son ensemble, il est généralement divisé en trois niveaux de décision (stratégique, tactique et opérationnel) qui sont résolus séquentiellement (Odoni, Rousseau et Wilson, 1994). Dans ce qui suit nous allons présenter brièvement les problèmes associés à ces différents niveaux stratégiques. Le lecteur désirant approfondir la littérature associée à ces problèmes est invité à consulter la revue de Desaulniers et Hickman (2004).

Le niveau stratégique (*strategic planning*) consiste principalement à effectuer le design du réseau (*network design*) afin de satisfaire la demande des usagers. Il faut donc déterminer les lignes des autobus et les points d'arrêts. Ce problème doit tenir compte de diverses contraintes comme la couverture minimale de certaines zones et l'infrastructure routière disponible. Cette étape est très importante car elle conditionnera la performance du réseau. Ceder et Wilson (1986) proposent deux formulations mathématiques pour effectuer le design du réseau et où une heuristique est utilisée afin de générer un grand nombre de routes. Patnaik, Mohan et Tom (1998) utilisent un algorithme génétique pour générer et sélectionner les routes du réseau. Les routes initiales sont générées à l'aide d'une heuristique similaire à celle de Ceder et Wilson (1986). 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 diverses lignes potentielles et le temps d'attente des passagers aux arrêts. Ils présentent une revue des modèles existants. Notons que les décisions concernant l'ouverture ou non d'un entrepôt et la localisation de celui-ci sont aussi des décisions de niveau stratégique.

Au niveau tactique (*tactical planning*), les principales décisions concernent la détermination des fréquences et des horaires d'autobus. Le problème de détermination des fréquences de service (*trip frequency scheduling*) cherche à allouer un nombre suffisant d'autobus aux différentes lignes en fonction de leur demande 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 testé diverses approches pour résoudre ce problème à l'aide de données réelles de la société de transport de Bangkok. La détermination des horaires (*timetabling*) consiste à convertir une fréquence de

service sur chaque ligne en un horaire. Partant de la structure des lignes, des temps de voyage et des fréquences désirées, l'objectif est de générer un ensemble de courses ainsi que leurs temps de passage aux terminus.

Ayant un ensemble de trajets et de ressources (autobus et chauffeurs), le niveau opérationnel (*operational planning*) cherche à construire les horaires des chauffeurs et des autobus de façon à minimiser les coûts tout en respectant les contraintes opérationnelles. Le problème de construction des horaires d'autobus (*vehicle scheduling problem*) est très étudié dans la littérature. Desrosiers, Dumas, Solomon et Soumis (1995) proposent une revue sur le problème de construction d'horaires d'autobus partant d'un seul dépôt alors que Dell'Amico, Fischetti et Toth (1993) présentent des heuristiques pour le cas à plusieurs dépôts. Ceder, Golany et Tal (2001) étudient un problème de synchronisation d'horaires 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. Chaque autobus doit parcourir une distance à vide afin d'atteindre, à partir de son entrepôt, le point de départ de la course qu'il doit effectuer 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 une distance qui ne procure pas de revenus 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.

Le problème de détermination des horaires des chauffeurs (*duty scheduling* ou *driver scheduling*) suit la détermination des horaires des autobus. Cette étape vise à assigner un chauffeur à chaque course. Lourenço, Paixão et Portugal (2001) 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 ; Valoux 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 courses puis les chauffeurs aux autobus puisque les coûts associés aux chauffeurs dominent généralement les coûts associés aux autobus. Pour terminer le niveau opérationnel, soulignons quelques contributions récentes (Winter et Zimmermann, 2000 et Hamdouni, Desaulniers, Soumis, Marcotte et Van Putten, 2003) sur la gestion du stationnement des autobus à l'intérieur d'un entrepôt afin de faciliter leur départ le matin.

Notons, pour terminer cette revue, que plusieurs logiciels ont été développés pour supporter les tâches reliées à la planification du transport urbain. À titre d'exemple, 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 d'établir les horaires des chauffeurs.

4. Minimisation du kilométrage à vide

Le problème de minimisation du kilométrage à vide est le suivant. Étant donné un ensemble d'entrepôts ouverts, un nombre maximum d'autobus disponibles par entrepôt et un ensemble de courses connues, déterminer les rentrées et les sorties d'autobus afin de minimiser le kilométrage total associé aux rentrées et aux sorties d'autobus. Ce problème est central dans la décision d'ouvrir un ou plusieurs nouveaux entrepôts puisqu'il détermine l'économie qu'il sera possible de réaliser sur le kilométrage à vide associé aux sorties et rentrées d'autobus. La Figure 1 illustre cette problématique à l'aide de la course 1024 du RTC. Le point 1 sur cette figure correspond à l'entrepôt, le point 2 au point de départ (terminus 8) de la course et le point 3 à son point de fin (terminus 51). Le kilométrage à vide associé à la sortie de l'autobus est de 14,2 kilomètres et il est de 6,1 kilomètres pour la rentrée de l'autobus. La course 1024 occasionne donc un total de 20,3 kilomètres à vide.

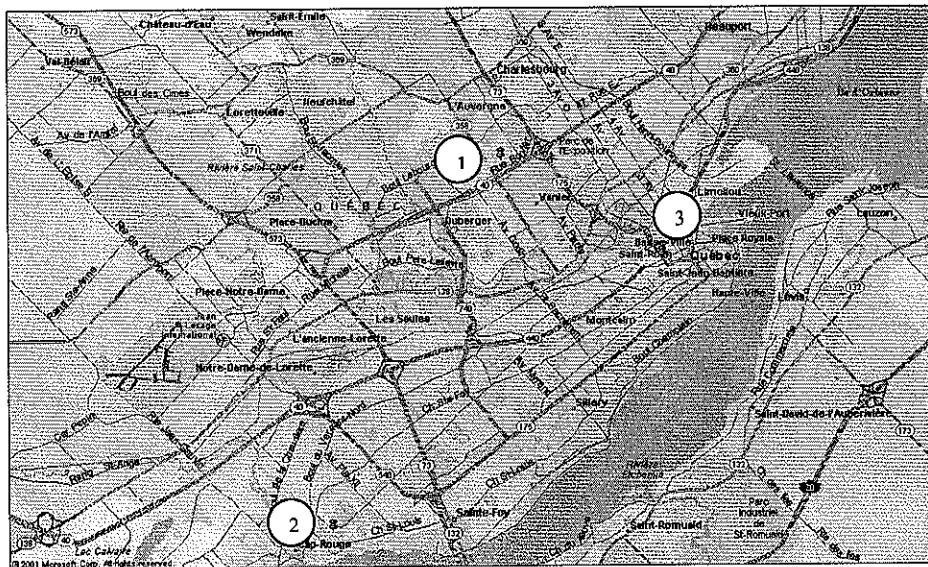


Figure 1

Le kilométrage à vide de la course 1024 au Réseau de Transport de la Capitale

Dans ce qui suit, nous proposons deux modèles pour résoudre ce problème. Le premier modèle oblige chaque autobus à revenir à son entrepôt de départ. Le second modèle relaxe cette hypothèse et permet de débuter 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 découplant 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 associé à la sortie et à la rentrée 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_{it} : ensemble des courses qui sortent à la période t de l'entrepôt i ;

R_{it} : ensemble des courses qui rentrent à la période t à l'entrepôt i .

Variables de décision

x_{ij} : variable binaire égale à 1 si la course j est affectée 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 :

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

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

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

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

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

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

$$n_{it} \geq 0 \quad (i = 1, \dots, m) ; (t = 1, \dots, T) \quad (8)$$

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_{it}) et de celles qui reviennent (ensemble R_{it}). Étant donné que le temps et la distance à parcourir pour débuter une course à partir d'un entrepôt et pour revenir à l'entrepôt après avoir terminé une course dépendent de l'entrepôt i , les ensembles S_{it} et R_{it} sont définis pour chaque entrepôt i . La contrainte (4) garantit qu'au début de 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 disponibles 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 un rôle important pour la faisabilité pratique de la solution en tenant une comptabilité des sorties et des rentrées d'autobus dans le temps. Ainsi, pour un nombre donné de courses, le modèle utilisera le nombre exact de véhicules. La contrainte (3) assure le respect de la capacité des entrepôts au début de chaque période.

Deuxième modèle

Le deuxième modèle diffère du premier par le fait qu'il permet à un autobus de terminer sa course à un entrepôt différent de son 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 associé à la sortie de la course j à partir de l'entrepôt i ;
- f_{ij} : kilométrage à vide associé à la rentrée de 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_{it} : ensemble des courses qui sortent à la période t de l'entrepôt i ;
- R_{it} : ensemble des courses qui rentrent à la période t à l'entrepôt i .

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 la rentrée de la course j est effectuée vers l'entrepôt i , 0 autrement;
- n_{it} : nombre d'autobus à l'entrepôt i au début de la période t .

Fonction objectif

$$\text{Minimiser} : \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n e_{ij} x_{ij} + \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n f_{ij} y_{ij} \quad (9)$$

Contraintes

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

$$\sum_{i=1}^m y_{ij} = 1 \quad (j = 1, \dots, n) \quad (11)$$

$$n_{it} = n_{i,t-1} - \sum_{j \in S_{i,t-1}} x_{ij} + \sum_{j \in R_{i,t-1}} y_{ij} \quad (i = 1, \dots, m) ; (t = 2, \dots, T) \quad (12)$$

$$n_{it} \leq c_i \quad (i = 1, \dots, m) ; (t = 1, \dots, T) \quad (13)$$

$$\sum_{i=1}^m n_{i1} = A \quad (14)$$

$$n_{i1} = n_{iT+1} \quad (i = 1, \dots, n) \quad (15)$$

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

$$y_{ij} = 0 \text{ ou } 1 \quad (i = 1, \dots, m) ; (j = 1, \dots, n) \quad (17)$$

$$n_{it} \geq 0 \quad (i = 1, \dots, m) ; (t = 1, \dots, T) \quad (18)$$

Étant donné que le nombre de courses à affecter est donné et qu'à chaque course correspond exactement une sortie et une rentrée d'autobus, ce modèle affecte chaque sortie et chaque rentrée à un entrepôt de façon à minimiser le kilométrage associé. Pour ce faire, la fonction objectif (9) comptabilise séparément le kilométrage à vide des courses qui sortent et qui rentrent aux entrepôts. La contrainte (10) assigne à chaque course un seul entrepôt de sortie. De même, la contrainte (11) assigne à chaque course un seul entrepôt de retour. La contrainte (12) permet de compter le nombre d'autobus se trouvant à chaque entrepôt i au début de chaque période t . La contrainte (13) 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 14) et que le nombre de véhicules en début et en fin de journée est le même pour chaque entrepôt (contrainte 15) si l'on désire que l'horaire soit réalisable d'une journée à l'autre.

Les deux modèles font l'hypothèse que la sortie et la rentrée d'un autobus se font dans deux périodes différentes (contraintes 3 et 12). Pour que ces contraintes soient respectées en tout temps, il faudrait fixer la longueur de la période de temps de façon à ce qu'elle soit inférieure au

plus petit lapse de temps entre une sortie et une rentrée. 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. Dans le cadre de cette étude nous avons utilisé des périodes de 30 minutes. Compte tenu de l'incertitude entourant les opérations quotidiennes d'une flotte d'autobus (heures précises des départs et des rentrées), nous pensons qu'il s'agit d'un compromis raisonnable et que l'utilisation d'une période de temps plus courte n'apporterait que très peu de gains réels de précision. De plus, le début de la première période doit précéder le départ de la première course de la journée et la fin de la dernière période succéder à l'arrivée de la dernière course de la journée. Notons finalement que notre objectif est de résoudre un problème stratégique à long terme et que les inévitables problèmes reliés aux opérations réelles peuvent être réglés par des ajustements aux horaires.

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

Afin de prendre une décision éclairée, le RTC désirait obtenir une analyse détaillée des impacts financiers associés à divers scénarios d'ouverture d'entrepôts. C'est pour cette raison que nous avons opté pour une analyse par scénarios plutôt que d'envisager l'utilisation d'un modèle intégrateur qui ne procurerait qu'une solution optimale sans fournir d'informations sur l'intérêt des autres options. Cette section montre donc comment les modèles développés ont été appliqués aux données réelles du RTC. À l'aide de ces modèles, nous sommes en mesure d'estimer l'économie résultant de la réduction du kilométrage à vide des divers scénarios envisagés et ainsi identifier le scénario qui minimise la durée de récupération de l'investissement.

Dans un premier temps nous présentons les sites potentiels et les divers coûts pertinents. Nous appliquons ensuite les modèles développés aux données du RTC afin d'estimer l'économie résultant de la réduction du kilométrage à vide. Suit 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. La direction du 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 lignes les plus importantes (représentant 65% du nombre de courses sur le réseau), nous avons calculé le nombre de sorties et de rentrées d'autobus vers chaque terminus utilisé. La Figure 2 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.

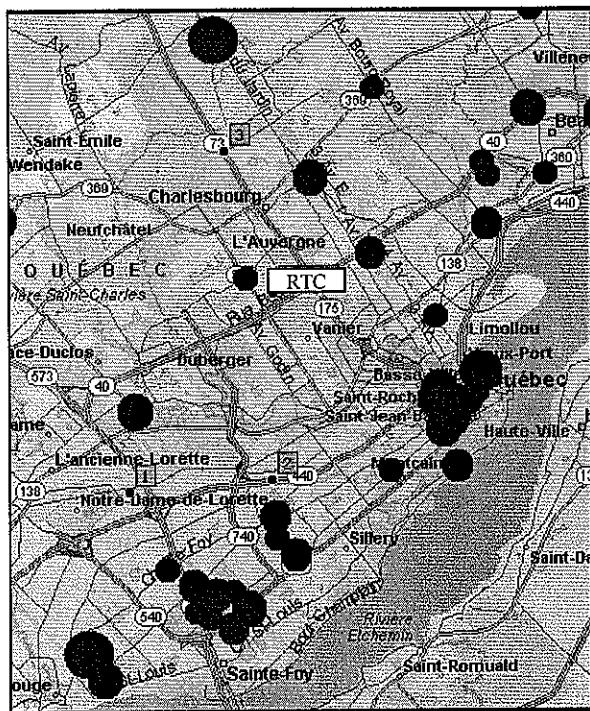


Figure 2
Localisation des sites candidats

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 m ² /véhicule × 1 040,72 \$/m ² :	55 680 \$/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 kilomètres à l'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 sorties et de rentrées. Ces courses couvrent 91 lignes distinctes et sont effectuées par 508 autobus qui constituent la flotte du RTC. 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 données *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. Cette rapidité est probablement la conséquence du faible nombre d'entrepôts considérés par le modèle.

La durée de la plus petite course est de 53 minutes et nous avons divisé la journée en 48 périodes de 30 minutes. 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 débuter 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 analysé 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 kilomètres. Ce résultat a été validé par les responsables du RTC. Le Tableau 1 présente les résultats de ces scénarios.

Les économies annuelles d'opération sont calculées de la façon suivante : (kilométrage à vide actuel – kilométrage à vide du scénario) × 3,5 \$/Km – coûts d'opérations annuels des entrepôts à créer. À titre d'exemple, les économies annuelles d'opérations 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'opération
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 bâties). 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 la diminution des économies. Le Tableau 3 analyse la possibilité de diminuer la capacité à 100, 90, 80 et 70 véhicules. Cette analyse est effectuée en ajustant le côté droit de la contrainte (4) dans le premier modèle. 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 procure 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 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 soit 8,44 années. Notons que le scénario G, offrant la plus grande économie annuelle, demande une période de remboursement de 14,99 années.

Tableau 4
Kilométrage à vide, capacité d'entreposage et économies d'opération 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 en modifiant le côté droit de la contrainte (13) du second modèle. 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, l'endroit où ils débutent leur journée diffère de l'endroit où

ils la terminent. Le RTC utilise des navettes pour ramener ces chauffeurs afin qu'ils puissent récupérer leur véhicule personnel. L'impact réel serait donc mineur.

Impact sur la congestion routière

Dans cette section nous évaluons *a posteriori* l'impact relié à l'ouverture d'un nouvel entrepôt sur la congestion routière aux alentours de l'entrepôt actuel. Il est important de noter que dans cette étude nous n'avons pas cherché à minimiser la congestion routière. Le phénomène de la congestion routière est compliqué et devrait être traité en tenant compte des problèmes de minimisation des distances à vide et de localisation des entrepôts en plus de tenir compte de plusieurs modes de transport simultanément. La congestion routière peut cependant être étudiée à l'aide de logiciels de transport connus comme EMME/2TM (INRO, 2003) qui permettent de tenir compte de plusieurs modes de transport à la fois. 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 sorties et les rentrées 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 rentrées 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 effectué le choix de sites d'entrepôts pour les autobus de transport urbain à l'aide d'une approche par scénarios. Cette approche nous a permis d'apprécier l'intérêt de chacun des scénarios et de mesurer l'impact de la taille de l'entrepôt sur la période de remboursement. Afin d'évaluer la réduction du kilométrage à vide associée à un scénario, nous avons développé deux modèles de programmation linéaire. L'approche a été appliquée aux données réelles du Réseau de Transport de la Capitale de la ville de Québec. 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 kilomètres tandis que l'ouverture d'un entrepôt sur le site Carillon permettrait de le réduire à 3 106 288 kilomètres (premier modèle) et à 2 824 713 kilomètres (deuxième modèle).

L'analyse des divers scénarios montre que l'option 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 dans le cadre de ce projet. Nous remercions également les arbitres et le rédacteur associé pour leurs commentaires constructifs qui ont grandement contribués à améliorer cet article.

Tableau 7

Sorties et rentrées 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	Rentrées	Sorties	Rentrées	Sorties	Rentrées
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 : 08h00	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 rentrées 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	Rentrées	Sorties	Rentrées	Sorties	Rentrées
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 : 08h00	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.
- Ceder A. et Wilson N. H. M. (1986), Bus network design. *Transportation Research – Part B*, 20B(4), 331-344.
- 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.
- 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.
- Dell'Amico M. Fischetti M. et Toth P. (1993), Heuristic algorithms for the multiple depot vehicle scheduling problem. *Management Science*, 39, 115-125.
- Desaulniers G. et Hickman M. D. (2004), Public Transit. Les Cahiers du GERAD G-2003-77, HEC Montreal. Proposé pour publication dans G. Laporte et C. Barnhart, *Handbooks in Operations Research and Management Science*.
- Desrosiers J., Dumas Y., Solomon M. M. et Soumis F. (1995), Time constrained routing and scheduling. Dans M. O. Ball, T. L. Magnanti, C. L. Monma et G. L. Nemhauser (éditeurs), *Networks Routing*, *Handbooks in Operations Research and Management Science* 8, Elsevier Science, Amsterdam, 35-139.
- Haase K., Desaulniers G. et Desrosiers J. (2001), Simultaneous vehicle and crew scheduling in urban mass transit systems. *Transportation Science*, 35, 286-303.
- Hamdouni M., Desaulnier G., Soumis F., Marcotte O. et Van Putten M. (2003), Parking and dispatching buses in depot using block patterns. À paraître dans *Transportation Science*.
- INRO Consultants Inc. The EMME/2 Transportation planning software: Modelling and analysis features. Montréal, Québec, Canada, 2003.

- Kasana H.S. et Kumar K.D. (2000), An efficient algorithm for multiobjective transportation problems, *Asia-Pacific Journal of Operational Research*, 17, 27-40.
- Lourenço H.R., Paixão J. P. et Portugal R. (2001), Multiobjective metaheuristics for the bus driver scheduling problem, *Transportation Science*, 35, 331-343.
- Odoni A. R., Rousseau J.-M. et Wilson N. H. M. (1994). Models in urban and air transportation. Dans S. M. Pollock, M. H. Rothkopf et A. Barnett (éditeurs), *Operations Research and the Public Sector*, Handbooks in Operations Research and Management Science 6, North-Holland, Amsterdam, 107-150.
- 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.
- Winter T. et Zimmermann U. T. (2000), Real-time dispatch of trams in storage yards. *Annals of Operations Research*, 96, 287-315.

Sites web consultés

- Les Conseillers INRO Consultants Inc. <http://www.inro.ca/>, en date du 25 octobre 2005.
- Réseau de Transport de la Capitale, <http://www.stcug.qc.ca/>, en date du 4 mai 2005.
- Statistiques Canada, <http://www.statcan.ca>, Le Quotidien, jeudi le 4 octobre 2001, en date du 14 mars 2003.

