

CONCEPTION DE TOURNÉES DE DÉNEIGEMENT ET D'ÉPANDAGE EN VIABILITÉ HIVERNALE URBAINE: CONSIDÉRATION DES CONTRAINTES OPÉRATIONNELLES RÉELLES

O. Quirion-Blais, M. Trépanier & A. Langevin
Département de Mathématiques et Génie Industriel
CIRRELT, Polytechnique Montréal, Canada

olivier.quirion-blais@polymtl.ca, mtrepanier@polymtl.ca & andre.langevin@polymtl.ca

RÉSUMÉ

La planification des parcours de déneigement est une tâche ardue demandant beaucoup de temps. Traditionnellement, les parcours sont conçus manuellement sur la base des connaissances des gestionnaires. Mais voilà que dans certaines organisations, la connaissance se perd, les fonds sont limités et les changements climatiques font évoluer les besoins sur le terrain vers des outils d'aide à la décision. Pour aider les planificateurs, les scientifiques développent de nouveaux modèles mathématiques qui font partie intégrante de ces outils de confection de parcours. Cet article présente un modèle mathématique apte à proposer une résolution exacte du problème de déneigement et d'épandage dans un réseau urbain, tout en tenant compte des nombreuses contraintes opérationnelles rencontrées sur le terrain.

DESIGN OF SNOW PLOWING AND DEICING ROUTES FOR URBAN WINTER VIABILITY: ADDRESSING ACTUAL OPERATIONAL CONSTRAINTS

ABSTRACT

The planning of vehicle routes for winter road maintenance is a time consuming task. Traditionally it is done by hand based on the experience and knowledge of the managers. The road networks getting larger, the expenses growing, and the climate changing, new ways of designing snow plow routes for better efficiency are required. To help planners, scientists are developing new mathematical methodologies to implement into planning tools. This article presents an exact model to address the operational constraints of snow plowing and deicing route planning, but also shows its limitations in view of a real world problem.

1. INTRODUCTION

Dans les pays où les hivers sont plus rigoureux, d'onéreux travaux d'entretien hivernal doivent être réalisés. Par exemple, dans les principales villes de la province de Québec, Canada, les dépenses se chiffrent entre 5,000\$ et 24,000\$ par kilomètre de voie routière. Au total, en considérant seulement les montants dépensés par les autorités provinciales, la facture s'élève à environ 250 millions de dollars annuellement [1]. Sur la planète, ce sont plus de 10 milliards de dollars qui sont dépensés pour maintenir les réseaux routiers sécuritaires [2]. Sans compter l'effet néfaste qu'ont les sels routiers et les abrasifs sur l'environnement [3]. Au cours des dernières années, les dépenses d'entretien ont beaucoup augmentés en raison de l'augmentation des coûts du pétrole et des matériaux d'épandage, mais aussi en raison de l'augmentation des exigences en terme de qualité de

service [4]. Pour cette raison on cherche maintenant de nouvelles avenues permettant de réduire les dépenses.

Dans cette optique, de nouvelles technologies telles que les SIG (systèmes d'information géographiques) and les SIMR (systèmes d'information météo routière) permettent d'acquérir et de traiter une information plus précise provenant du terrain. Ye, Shi and Strong [5] ont démontré que ces technologies pouvaient aidées à la gestion des travaux d'entretien routier. Une manière de traiter l'information est d'utiliser des algorithmes mathématiques pour concevoir des nouvelles tournées de déneigement ou de déglacage. Cet article décrit donc un nouvel algorithme développé spécifiquement en considérant les contraintes liées au déneigement. Dans la première partie, une revue de littérature présente l'état de l'art et propose des méthodes de déneigement et de déglacage. Ensuite, l'étude de cas à partir de laquelle le modèle mathématique a été développé est présentée. Cependant, en raison de la limite de la puissance des processeurs actuels, le modèle mathématique n'a pu être appliqué que sur un réseau de taille réduite. Finalement, pour pallier le manque de puissance, le développement d'une métaheuristique permettant le traitement du réseau en entier est discuté.

2. CONTEXTE

2.1. Problématiques liées à l'entretien hivernal

Règle générale, l'entretien hivernal a peu été traitée dans la littérature. Cette situation s'explique par la complexité des problèmes et la spécificité liée à chaque site. Les grandes classes de problèmes logistiques rencontrés en entretien hivernal sont :

- conception des secteur de travail;
- conception de tournées pour l'épandage de produits chimiques ou abrasifs;
- conception de tournées de déneigement;
- conception de tournées pour le chargement de la neige dans les camions;
- conception de tournées pour le transport de la neige aux site de dépôt;
- localisation des garages de véhicules et des dépôts à neige;
- dimensionnement des flottes de véhicules et des équipes de travail;
- planification des budgets;
- externalisation des travaux à des entrepreneurs privés;
- planification des horaires de travail et d'entretien des véhicules.

Chacun des ces problèmes comporte des contraintes spécifiques. Perrier et al. [6, 7, 8, et 9] les ont recensés au travers d'une revue de littérature en quatre parties. Récemment, Perrier et al. [10] ont ajouté un chapitre de livre, traitant spécifiquement des opérations d'épandage de sels routiers, à leur revue de littérature.

Le présent article traite plus particulièrement de la conception des tournées de déneigement. Dans ce cas, les principales contraintes à considérer sont :

- Restrictions de virages : Les demi-tours doivent être évités autant que possible pour des raisons de sécurité ainsi que des raisons opérationnelles. Par ailleurs, les virages à gauche doivent aussi être évités afin de ne pas laisser d'andain de neige dans les intersections.
- Véhicules hétérogènes : certains véhicules sont plus rapides que d'autres. Ces véhicules devraient donc être envoyés plus loin.
- Dépendance rue/véhicule : les rues plus étroites nécessitent des véhicules plus petits.

- Hiérarchie du réseau routier : une plus grande priorité est accordée aux rues commerciales ainsi que dans les voisinages des postes de police, casernes de pompiers, hôpitaux et écoles. Une priorité plus basse est donnée aux routes rurales.
- Équilibrage des charges de travail : chaque véhicule devrait avoir à peu près la même charge de travail.
- Couverture partielle du réseau : certaines rue sont desservies par d'autres autorités. Ces routes peuvent donc être traversées, mais n'ont pas à être desservies par les véhicules de la municipalité.

Le problème de tournées de véhicules de déneigement est classé parmi la famille des problèmes de tournées sur les arcs. Pour une question de brièveté, la revue de littérature qui suit porte principalement sur les travaux à propos des tournées de déneigement.

2.2. Algorithmes pour les tournées de déneigement

Quatre types d'approches ont été mises de l'avant pour la conception de tournées de déneigement : simulation, programmation mathématique, heuristiques et métaheuristiques.

2.2.1. Simulation et programmation mathématique

La première approche adoptée fut la simulation. Parmi les outils décisionnels développés, Turk et Clohan [11] ont proposé un algorithme permettant d'améliorer les tournées de déneigement. Cet algorithme est intégré dans une simulation qui considère les conditions météorologiques, la condition initiale du réseau et les caractéristiques des camions pour déterminer l'efficacité des tournées. L'outil a été testé avec une étude de cas portant sur la ville de Newington, Connecticut. Le principal inconvénient des simulations est qu'elles requièrent généralement un long temps de développement et que les modèles sont souvent spécifiques aux cas étudiés.

Le deuxième type d'approche est la programmation mathématique. Par exemple, Tagmouti et al. ont modélisé le problème comme une tournée de véhicules avec fenêtres de temps [12] tout en considérant la capacité des véhicules. Cependant, cette formulation nécessitait une transformation mathématique pour passer d'un problème de tournées sur les arcs à un problème de tournées sur les nœuds équivalent. Ils ont résolu des cas allant jusqu'à 40 segments de rue à desservir. Cela démontre que ce type de résolution ne s'adresse qu'aux cas restreints en terme de grosseur puisque le nombre de contraintes et de variables augmentent exponentiellement. En fait, pour la conception de tournées de déneigement, ce type de méthodologie ne peut pratiquement pas être utilisé à moins de ne pas tenir compte de certaines contraintes. En fait, la programmation mathématique est surtout utilisée pour démontrer la complexité des problèmes.

2.2.2. Heuristiques

Le troisième type d'approche consiste à concevoir un algorithme qui crée de bonnes solutions en tenant compte des caractéristiques du problème. Les heuristiques pour les tournées de déneigement peuvent être classées parmi trois catégories : construction, deux phases et composites.

Les heuristiques de construction sont les plus simples, car elles sont basées sur des règles simples. Par exemple, Lemieux and Campagna [13] ont proposé un algorithme qui crée un sous-réseau pour chaque véhicule. Lors de la création des sous-réseaux, l'algorithme s'assure que le dépôt est inclus et que les deux directions de chaque segment de rue sont desservis par le même véhicule. Ensuite, les rues des sous-réseaux sont

ordonnées suivant des règles données pour former les tournées de déneigement. Ce type de méthode peut procurer de bons résultats dans une période de temps relativement restreinte. Les heuristiques en deux phases suivantes ont donné des résultats encore meilleurs. Il existe deux types d'heuristiques en deux phases : groupes en premier, tournées en second ou tournée en premier, groupes en second. Le premier consiste à diviser les arcs du réseau parmi les véhicules disponibles, puis créer des tournées dans chaque secteur ainsi formé. Un exemple d'une méthode groupe en premier, tournée en second a été développé par Perrier et al. [14]. Ils ont appliqué leur algorithme à un cas d'étude portant sur la ville de Dieppe, au Nouveau-Brunswick, Canada. Ils ont amélioré les tournées précédentes en terme de longueur totale et en terme de demi-tours.

Le dernier type d'heuristique sont les heuristiques composites. Il consiste à mélanger différentes techniques pour construire des tournées. Par exemple, Kandula et Wright [15] ont conçu une heuristique en trois étapes. Dans un premier temps, un nombre de segments de route égale au nombre de véhicules est sélectionné en suivant certaines règles données. Ces segments sont appelés germes puisque les tournées seront conçues à partir de ceux-ci. Pour chaque germe, les segments de route sont sélectionnés de manière à créer une tournée continue et dans le but de maximiser la distance avec le dépôts. La tournée est terminée lorsqu'aucun autre segment de route ne peut être trouvé près de la tournée en cours ou lorsque la durée maximale de la tournée a été atteinte. La tournée est fermée en ajoutant tous les segments en direction opposée à ceux qui ont été sélectionnés afin de s'assurer que chaque véhicule couvre les deux côté des rues. Par la suite, une procédure d'amélioration est réalisée en échangeant les segments de rue à l'intérieur des tournées et entre les véhicules. Cette heuristique a été testée en utilisant des données de Indiana Department of Transportation (INDOT).

2.2.3. Métaheuristiques

Les métaheuristiques sont des méthodes plus complexes composées d'une phase de construction initiale suivie d'une phase d'amélioration. C'est le type de méthode qui a été conçu le plus récemment et il permet d'obtenir de très bons résultats. Par exemple, Handa et al. [16 and 17] ont développé un algorithme mémétique intégré à un système d'information géographique qui utilise les prévisions météorologiques pour mettre à jour les tournées d'épandage. Cet algorithme, basé sur une analogie avec la génétique, altère les tournées en vigueur (parents) en échangeant des portions de tournées sélectionnées (croisements) pour en créer de nouvelles (nouvelle génération). Une recherche locale est ensuite exécutée en déplaçant les liens à l'intérieur des tournées ou entre les tournées. La nouvelle solution est ensuite évaluée en utilisant une fonction mathématique qui évalue le coût des tournées et ajoute une pénalité pour les virages interdits.

Omer [18] a utilisé une procédure de recherche gloutonne aléatoire adaptative (greedy randomized adaptive search procedure, GRASP) jumelée à une procédure de recuit simulé pour concevoir des tournées d'épandage hivernal. La première étape du GRASP est une heuristique qui construit les tournées, une par une, en choisissant aléatoirement les segments de rue d'une liste de candidats ayant un bon potentiel. Les candidats sont sélectionnés de manière à maintenir la tournée réalisable tout en minimisant une fonction d'évaluation donnée. La deuxième étape, le recuit simulé, consiste à améliorer la solution initiale. Les tournées construites précédemment sont donc reprises et les segments de rues sont déplacés en suivant certaines règles. Des opérateurs de réparation sont ensuite utilisés pour rendre les tournées réalisables. À chaque étape, une fonction "température" évalue la qualité de la nouvelle solution, plus la température est basse, meilleure est la solution. Parfois, des élévations de température peuvent aussi être permises afin de s'échapper des minimums locaux, qui empêchent d'obtenir de meilleures solutions. Cet

algorithme a donné de bons résultats avec des cas théoriques, mais aucun tests sur des cas pratiques n'ont été décrits.

Par ailleurs, l'aspect des tournées en viabilité hivernale a été traité par Tagmouti et al. [19 and 20]. Leur algorithme est basé sur une descente à voisinage variable qui utilise les mises à jour des services météorologiques. Des fenêtres de temps, au cours desquelles les segments de routes doivent être traités, sont déterminées. L'algorithme crée ensuite des routes limitant le nombre de segment traités à l'extérieur de leur fenêtre de temps. Cette méthodologie a été testée avec des cas théoriques. Plus récemment, Salazar-Aguilar et al. [21] ont étudié le problème de la synchronisation des véhicules au cours des opérations de déneigement en tandem. Pour résoudre ce problème, ils ont conçu une heuristique de recherche à large voisinage adaptatif. Des tournées réalistes ont été obtenues à la suite de tests sur des cas réels et théoriques.

3. MÉTHODOLOGIE

Cette section présente d'abord le cas d'étude, basé sur des données réelles, utilisé pour cette étude. Par la suite, les éléments considérés lors de l'élaboration de la méthode sont aussi présentés. Ensuite, un modèle mathématique tenant compte de ces contraintes est proposé. La mise en œuvre, quant à elle, est présentée à la section 4.

3.1. Étude de cas

L'étude de cas porte sur la municipalité de Dolbeau-Mistassini, une ville de 14,500 habitants située dans le nord du Québec. Le réseau routier de la ville s'étend sur plus de 265 kilomètres et il est composé de rues résidentielles, collectrices, artérielles et rurales. Le plan du réseau routier est présenté aux figures 1 et 2 tandis que le tableau 1 donne les principales caractéristiques du réseau. En moyenne, la municipalité reçoit 260 cm de neige sur une période d'environ 6 mois La température moyenne en janvier est de -18°C.

Le réseau montre une configuration mélangeant des caractéristiques rurales et urbaines. Dans la partie rurale, la densité des rues est moins grande et la plupart des intersections sont à trois voies. À l'opposé, dans la partie urbaine, la densité de rue est plus élevée, il y a plus d'intersections et la plupart de celles-ci sont à quatre voies.

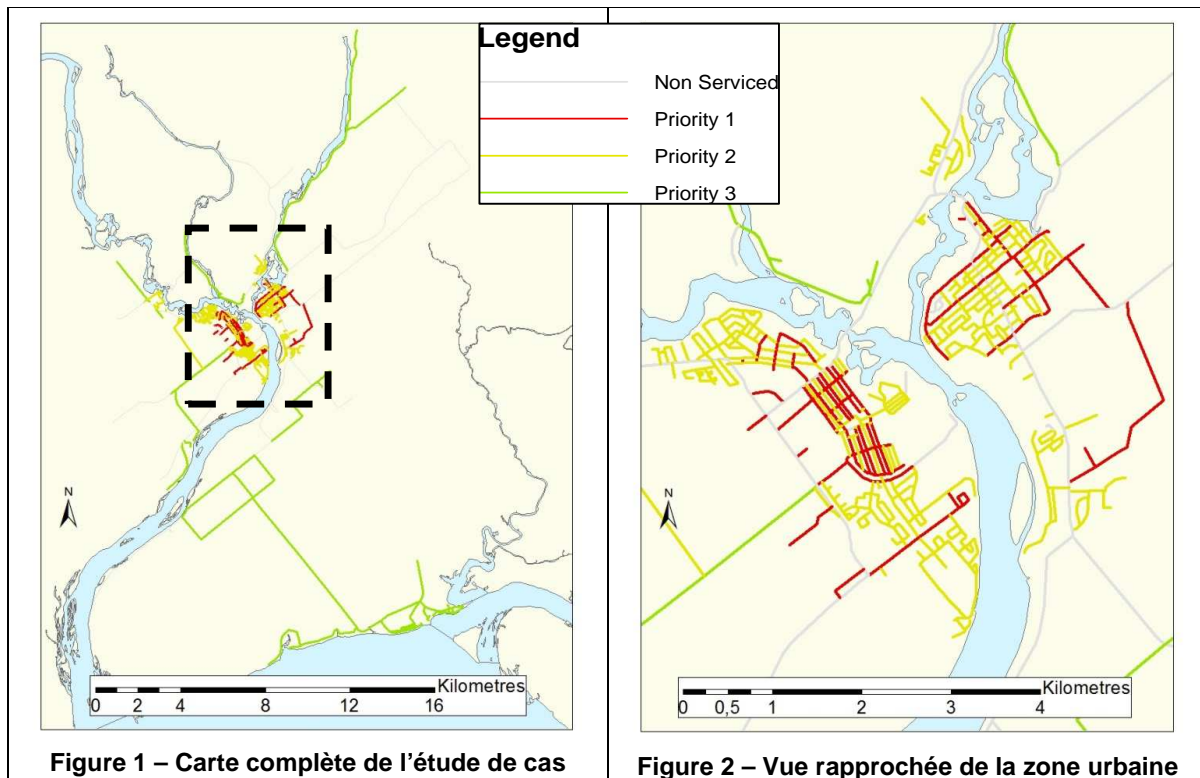


Tableau 1 – Caractéristiques du réseau routier de Dolbeau-Mistassini

Hiérarchie (priorité)	Longueur de route (km)	Nombre de segments routiers
1	27.5	198
2	66.9	483
3	84.4	105

La municipalité possède des chargeurs frontaux, plutôt lents, qui déneigent principalement les rues locales; des niveleuses, qui déneigent des rues urbaines de plus grande importance; et des camions six-roues, qui sont équipés pour faire le déneigement et l'épandage simultanément. Les vitesses des véhicules sont données dans le tableau 2 en fonction de la priorité des segments de rues. Dans cette ville, plusieurs contraintes doivent être considérées. En plus de celles mentionnées dans la première section de cet article, il faut réduire le nombre de demi-tours, voire les éliminer sur les routes majeures pour des questions de sécurité. Cependant, d'autres demi-tours sont obligatoires, comme de le cas des impasses.

Tableau 2 - Vitesses (km/h) des véhicules selon la priorité des segments de route.

	Veh 1	Veh 2	Veh 3	Veh 4	Veh 5	Veh 6	Veh 7	Veh 8
Priorité 1	25	15	35	25	25	30	20	35
Priorité 2	25	15	35	25	25	30	20	35
Priorité 3	25	20	40	25	25	30	25	50
Hors service	40	90	45	40	32	90	30	90

3.2. Formulation mathématique exacte du problème

La formulation mathématique suivante a été développée pour modéliser le problème et les contraintes du cas d'étude.

Les variables sont :

$$x_{ij}^{kvp} = \begin{cases} 1 & \text{si le véhicule } v \text{ traverse l'arc } i, \text{ précédé de } j, \text{ à} \\ & \text{la position } k \text{ dans la classe de priorité } p \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$$

$$y_{ij}^{kvp} = \begin{cases} 1 & \text{si le véhicule } v \text{ dessert l'arc } i, \text{ précédé par } j, \text{ à} \\ & \text{la position } k \text{ dans la classe de priorité } p \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$$

t^{vp} fin de la priorité p pour le véhicule v

$TMAX^P$ temps de fin maximal pour la priorité p

T^{tot} total de tous les temps de fin pour tous les véhicules.

Les paramètres sont :

K nombre d'arcs par véhicules

V nombre de véhicules

P plus basse priorité (1 est la plus importante)

f_{ij} valeur de la pénalité pour tourner de l'arc i vers l'arc j .

a_{init} un arc artificiel arc qui entre dans le dépôt (pour permettre une entrée direct sur le réseau à partir du dépôt)

n^l un nœud artificiel qui permet de sortir du réseau à partir de n'importe quel endroit dans le réseau pour éviter des pénalités supplémentaires

M^{tot} pondération pour le temps total

M^P pondération pour les temps de fin de priorité.

Les ensembles sont :

A ensemble des arcs du réseau (excluant les arcs artificiels)

A_{end} ensemble des arcs permettant d'atteindre n^l pour quitter le réseau

A_{Asevv}^p ensemble des arcs à desservir, classe de priorité p

$j|x_{ij}^{kvp} \exists$ j ensemble des arcs où x_{ij}^{kvp} existe (i.e. il doit y avoir un lien entre i et j).

Objectif:

$$1. \text{Min} \left(\begin{aligned} & \sum_{p=1}^P (TMAX^P M^P) + T^{tot} M^{tot} \\ & + \sum_{p=1}^{P+1} \sum_{v=1}^V \sum_{k=1}^K \sum_{i \in A} \sum_{j|x_{ij}^{kvp} \exists} f_{ij} (x_{ij}^{kvp} + y_{ij}^{kvp}) \end{aligned} \right)$$

Sujet à :

$$2. TMAX^P \geq t^{vp} \quad p = \{1 \dots P, P + 1\}$$

$$3. t^{vp} = \sum_{k=1}^K \sum_{i \in A} \sum_{j \in A} (x_{ij}^{kvp} t p_i^v + y_{ij}^{kvp} t s_i^v) \quad p = \{1 \dots P, P + 1\}, v = \{1 \dots V\}$$

$$4. \sum_{p=1}^{P+1} \sum_{j \in A | x_{ij}^{kvp} \exists} (x_{ij}^{kvp} + y_{ij}^{kvp}) = \sum_{p=1}^{P+1} \sum_{l \in A | x_{li}^{k+1, vp} \exists} (x_{li}^{k+1, vp} + y_{li}^{k+1, vp})$$

$$k = \{2 \dots K\}, v = \{1 \dots V\}, i \in A \cup A_{end} \cup a_{init}$$

$$5. \sum_{p=1}^{P+1} \sum_{j \in A} x_{ia_{init}}^{1vp} = 1 \quad v = \{1 \dots V\}$$

$$6. \sum_{p=1}^{P+1} \sum_{i \in A} \sum_{j | x_{ij}^{1vp} \exists} x_{ij}^{1vp} = 0 \quad v = \{1 \dots V\}$$

$$7. \sum_{k=1}^K \sum_{i \in A_{end}} \sum_{j \in A} x_{ij}^{kvp+1} = 1 \quad v = \{1 \dots V\}$$

$$8. \sum_{j | x_{ij}^{kvp} \exists} (x_{ij}^{kvp} + y_{ij}^{kvp}) \leq \sum_{p^*=p}^{P+1} \sum_{l | x_{li}^{k+1, vp^*} \exists} (x_{li}^{k+1, vp^*} + y_{li}^{k+1, vp^*})$$

$$k = \{2 \dots K\}, p = \{1 \dots P, P + 1\}, i \in A \cup a_{init} \cup A_{end}$$

$$9. \sum_{k=1}^K \sum_{v=1}^V \sum_{p^*=1}^p \sum_{j | y_{ij}^{kvp^*} \exists} y_{ij}^{kvp^*} = 1 \quad i \in A_{ToBeServiced}^p, p = \{1 \dots P\}$$

$$10. x_{ij}^{kvp} \in \{0,1\} \quad i \in A \cup A_{end}, j \in A \cup a_{init} \cup A_{end}, k = \{1 \dots K\}, v = \{1 \dots V\},$$

$$p = \{1 \dots P, P + 1\}$$

$$11. y_{ij}^{kvp} \in \{0,1\}$$

$$i \in A \cup A_{end}, j \in A \cup a_{init} \cup A_{end}, k = \{1 \dots K\}, v = \{1 \dots V\}, p = \{1 \dots P, P + 1\}$$

$$12. t^{vp} \geq 0 \quad v = \{1 \dots V\}, p = \{1 \dots P, P + 1\}$$

$$13. TMAX^p \geq 0 \quad p = \{1 \dots P, P + 1\}$$

La fonction objectif (équation 1) est composée de trois parties :

1. $\sum_{p=1}^P (TMAX^p M^p)$: permet de réduire le temps de fin maximal de chaque classe de priorité p pondérée par un facteur M^p . Pour cette étude de cas, les valeurs suivantes ont été utilisées : $M^1 = 1,000$, $M^2 = 100$, $M^3 = 10$.
2. $T^{tot} M^{tot}$: permet de normaliser le temps total de toutes les tournées (T^{tot}) avec une pondération M^{tot} . Pour cette étude de cas, une valeur de 5,000 a été donnée à M^{tot} après plusieurs essais.
3. $\sum_{p=1}^{P+1} \sum_{v=1}^V \sum_{k=1}^K \sum_{i \in A} \sum_{j | x_{ij}^{kvp} \exists} f_{ij} (x_{ij}^{kvp} + y_{ij}^{kvp})$: permet de pénaliser les virages selon un facteur f_{ij} en relation avec le type de virage. La figure 3 montre que les virages à droite ne sont pas pénalisés puisqu'ils ne laissent pas d'andain de neige dans les intersections. À l'opposé, si le véhicule va tout droit ou qu'il tourne à gauche, l'intersection peut être obstruée. Ces types de virages sont donc pénalisés ($f_{ij} = 500$ and $f_{ij} = 5,000$). Pour les opérations de d'épandage, il faut plutôt favoriser les lignes droites, les facteurs sont donc ajustés en conséquence. Le facteur de pénalité est déterminé en fonction de l'angle entre deux arcs consécutifs d'une tournée comme illustré sur la figure 3. Les valeurs de M^p et f_{ij} doivent être choisies en fonction des caractéristiques du réseau.

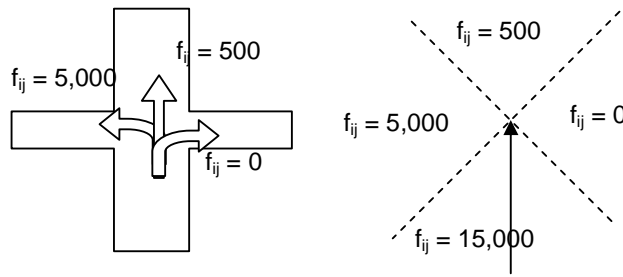


Figure 3 – Pénalités de virage.

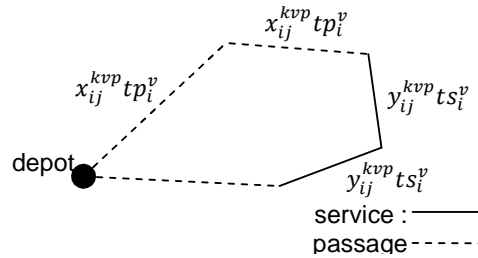


Figure 3 – Représentation schématique de la contrainte (3).

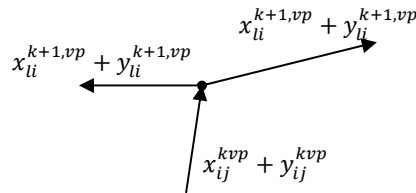


Figure 4 – Représentation schématique de la contrainte (4).

La contrainte définie en (2) permet de trouver le temps de fin de priorité de chaque classe de priorité p en choisissant le t^{vp} plus élevé parmi tous les véhicules. La contrainte (3) somme les temps de passage et de service pour obtenir le temps de fin pour chaque priorité et chaque véhicule (figure 4). La contrainte (4) assure la continuité des tournées de k à $k + 1$ pour chaque combinaison véhicule-priorité possible (figure 5). Les contraintes (5) et (6) assure que toutes les tournées débutent au dépôt de véhicule. Pour ce faire, toutes les tournées doivent avoir $j = a_{init}$ à $k = 0$. a_{init} est un arc artificiel qui termine au dépôt, qui précède le premier arc desservi ou traversé pour chaque tournée. La contrainte (7) permet au véhicule v de quitter le réseau à n'importe quel k en empruntant un lien artificiel de l'ensemble A_{fin} . Ensuite, le véhicule v arrive au nœud n_l où aucune autre pénalité de virage, de service ou de passage n'est imputée. De plus, il n'est plus possible de retourner dans le réseau, la tournée est donc complétée (figure 6).

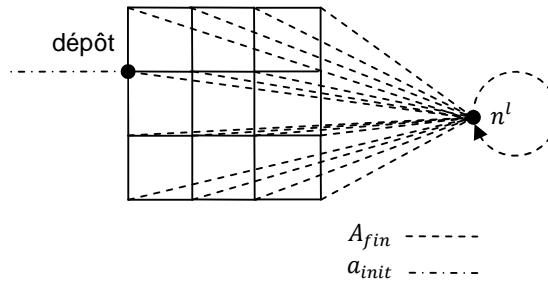


Figure 5 – Représentation schématique des contraintes (5) et (7).

Les contraintes (8) et (9) assure la continuité des classes de priorités p . Tous les arcs devant être traités sont classés selon leur priorité nominale dans un des ensembles $A_{ToBeServiced}^p$. Une classe de priorité p est terminée lorsque tous les arcs de priorité nominale p ($A_{ToBeServiced}^p$) ont été traités. Des promotions sont autorisées, ce qui signifie qu'un arc de priorité nominale supérieure à p peut être traité dans une classe de priorité inférieure, mais sera affecté d'une plus grande pénalité. Donc, un arc de priorité nominal 1 doit être desservi au cours de la classe de priorité 1. Cependant un arc de priorité 2 (ou supérieur) peut être desservi durant la classe de priorité 1, tout en étant pénalisé comme un arc de priorité 1 (figures 5 et 6). Les contraintes (10), (11), (12) et (13), quant à elles, servent à définir les variables.

$$\sum_{p^*=p}^{P+1} (x_{ij}^{k+1, vp^*} + y_{ij}^{k+1, vp^*}) \sum_{p^*=p}^{P+1} (x_{li}^{k+1, vp^*} + y_{li}^{k+1, vp^*})$$

$x_{ij}^{kvp} + y_{ij}^{kvp}$

Figure 6 – Représentation schématique de la contrainte (8).

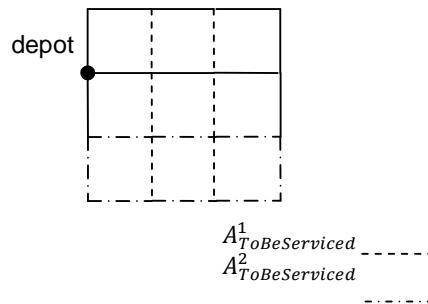


Figure 7 – Représentation schématique de la contrainte(9).

4. EXPÉRIMENTATIONS

Pour le moment, il n'est pas possible d'utiliser la formulation linéaire mathématique en nombre entier pour résoudre le cas d'étude décrit. Cela s'explique par le fait que les logiciels de résolution qui existent actuellement ne peuvent gérer les millions de variables requises.

Un réseau simple a été conçu pour tester le modèle mathématique (figure 9). Les paramètres du réseau sont :

- longueur ou coûts des segments de rue (t_i);
- priorité des segments de rue (p_i);
- position des nœuds pour calculer les pénalités de virage ou, plus directement, la valeur des pénalités de virage pour passer de j à i (f_{ij});
- position du dépôt de véhicule, où toutes les tournées débutent;
- nombre de véhicules (V).

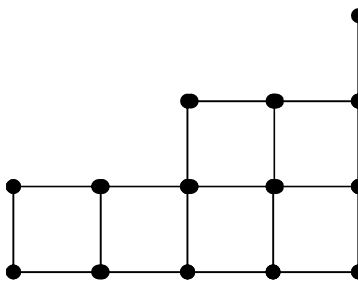


Figure 8 – Réseau théorique utilisé pour tester la formulation linéaire.

Le nombre d'arcs dans le réseau a été maintenu bas en raison du nombre élevé de contraintes et de variables. Il est principalement limité par K , le nombre maximum de segments de rue dans chaque tournée. La résolution a été limitée à $K=18$ pour deux véhicules. Avec un K supérieur, l'optimalité ne peut pas être garantie. En fait, même si une solution est fournie par le logiciel, l'optimalité n'est pas garantie puisque le nombre d'arcs est limitée dans chaque tournée par la formulation.

L'échelle de ce réseau théorique ne correspond évidemment pas à celle d'un cas réel où le nombre d'arcs peut atteindre plus de 800. Cependant, le réseau aide à assurer la validité de la formulation.

DISCUSSION ET CONCLUSION

Cet article propose une formulation exacte pour une étude de cas réel portant sur la ville de Dolbeau-Mistassini, Québec. L'étude de cas a permis d'identifier les contraintes opérationnels, à savoir, la capacité et la vitesse des véhicules, le retour au dépôt, la hiérarchie du réseau à desservir, etc. Le modèle mathématique a pu être utilisé pour la résolution du problème. Cependant, résolution est limitée à de très petits réseaux qui ne reflètent pas la réalité. Cette situation peut être contournée de deux manières : 1) utiliser un puissant logiciel de résolution pouvant traiter un réseaux de plus de 800 arcs; 2) développer une heuristique pour créer des tournées de déneigement.

Le développement d'une métaheuristique a été favorisé pour la suite de ce projet. Dans le but de résoudre l'étude de cas, une approche quasi optimale a été développée. Il s'agit d'un algorithme de recherche à grand voisinage adaptatif (Adaptative Large Neighborhood

Search) basé sur celle développée par Salazar-Aguilar et al. [21]. L'avantage d'une telle métaheuristique est qu'elle permet d'obtenir de bonnes tournées avec de grands cas à l'échelle des cas réels. De plus, plusieurs contraintes peuvent être considérées comme requis par le problème de création des tournées de déneigement tout en gardant le temps de résolution relativement court. Cette méthodologie est divisée en deux phases: premièrement, une solution réalisable (un ensemble de tournées) est créée en utilisant un algorithme de construction simple. Puis, les tournées sont améliorées en appliquant des opérateurs de destruction/réparation selon certaines règles prédéterminées. La mise au point de ces opérateurs exige beaucoup d'expérimentations. Pour mesurer l'amélioration de la solution, une fonction objectif identique à celle utilisée pour la formulation exacte est utilisée. Cependant, la phase d'amélioration de la métaheuristique peut accepter une certaine dégradation de la valeur de la fonction objectif afin de s'échapper des minimums locaux, et ce, dans le but d'atteindre le minimum global. Quant au modèle exact, même s'il peut prendre plusieurs jours avant d'atteindre le critère d'optimalité, pourrait être utilisé pour calculer la valeur optimale de la fonction objectif. Quoiqu'il en soit, à la fin, les résultats doivent toujours être validés par les gestionnaires des opérations de déneigement et d'épandage des autorités visées. S'ils jugent que les tournées sont inacceptables, des améliorations pourraient être apportées à la métaheuristique afin d'obtenir de meilleurs résultats.

Puisque nos travaux sont destinés à utilisation pratiques, il vaut la peine de souligner que les résultats obtenus sont disponibles sous format SIG. Cela signifie qu'ils pourraient facilement être convertis en un format compatible avec les appareils GPS utilisés par les chauffeurs de camion.

REMERCIEMENTS

Les auteurs tiennent à remercier le département des travaux routier de la ville de Dolbeau-Mistassini qui nous ont fourni les données utilisées pour les expérimentations. Les auteurs remercient aussi le Conseil de recherches en sciences naturelles et en génie du Canada, le Fonds FRQNT du Ministère des études supérieures, de la recherche, de la science et de la technologie du Québec et Transport Québec, qui ont fourni du support pour ce travail.

RÉFÉRENCES

1. Agence QMI (2011). Coût du déneigement: des disparités étonnantes. In Canoe.ca, argent. Consulted on 2013, 10th January. From <http://argent.canoe.ca/lca/affaires/quebec/archives/2011/01/20110124-060555.html>.
2. Thornes J., Chapman L. (2008). The Next Generation Road Weather Information System: A New Paradigm for Road and Rail Severe Weather Prediction in the UK. *Geography Compass*, 2(4), 1012-1026.
3. Environment Canada (2012). Road Salts. In Government of Canada. Consulted on 2013, 10th January from <http://www.ec.gc.ca/sels-salts/default.asp?lang=Fr&n=8CA814AB-1>
4. Berger, Y. (2010) Évaluation des nouveaux modes de gestion en entretien hivernal au ministère des Transports du Québec. *Actes du congrès mondial de viabilité hivernale à Québec*, Association mondiale de la route, 12 p.
5. Ye, Z., Shi, X. & Strong, C.K. (2009). Cost-Benefit Analysis of the Pooled-Fund Maintenance Decision Support System: Case Studies. *Presentations from the 12th AASHTO-TRB Maintenance Management Conference*, pp.229-243.
6. Perrier, N., A. Langevin and J.F. Campbell. (2006). A survey of models and algorithms for winter road maintenance. Part I: system design for spreading and plowing. *Computers and Operations, Research*, Vol.33, Issue 1, pp. 209-238.
7. Perrier, N., A. Langevin and J.F. Campbell. (2006). A survey of models and algorithms for winter road maintenance. Part II: System design for snow disposal. *Computers and Operations Research*, Vol. 33, Issue 1, pp. 239-262.

8. Perrier, N., A. Langevin and J.F. Campbell. (2007). A survey of models and algorithms for winter road maintenance Part III: vehicle routing and depot location for spreading. *Computers & Operations Research*, Vol. 34, Issue 1, pp. 211-257.
9. Perrier, N., A. Langevin and J.F. Campbell. (2007). A survey of models and algorithms for winter road maintenance Part IV: vehicle routing and fleet sizing for plowing and snow disposal. *Computers & Operations Research*, Vol. 34, Issue 1, pp. 258-294.
10. Perrier N., Campbell J. F., Gendreau M., Langevin A. (2011). Vehicle Routing Models and Algorithms for Winter Road Spreading Operations. In J. R. Montoya-Torres, A. A. Juan, L. H. Huatuco, J. Faulin & G. L. Rodriguez-Verjan, (Éds.), *Hybrid Algorithms for Service, Computing and Manufacturing Systems: Routing and Scheduling Solutions* (pp. 15-46). Hershey, PA: Information Science Reference.
11. Tucker WB, Clohan GM. (1979). Computer simulation of urban snow removal. In: *Snow removal and ice control research. Special report no. 185*. Washington, DC: Transportation Research Board. pp. 293–302.
12. Tagmouti, M., Gendreau M. & Potvin J.-Y. (2007) Arc Routing Problems with Time-Dependent Service Costs. *Journal of Operational Research*, 181, pp. 30-39.
13. Lemieux, P. F., Campagna, L. (1984). The Snow Ploughing Problem Solved by a Graph Theory Algorithm. *Civil Engineering Systems*, 1, pp. 337-341.
14. Perrier, N., A. Langevin and C.-A. Amaya. (2008) Vehicle Routing for Urban Snow Plowing. *Transportation Science*, vol. 42, No. 1, February 2008, pp. 44-56.
15. Kandula P. and J.R. Wright. (1997) Designing network partitions to improve maintenance routing. *Journal of Infrastructure Systems*. Vol. 3, pp.160–168.
16. Handa, H., L. Chapman and Y. Xin. (2005). Dynamic salting route optimization using evolutionary computation. In *Proceedings of the 2005 IEEE Congress on Evolutionary Computation*, pp.158-165.
17. Handa, H., L. Chapman and Y. Xin. (2006) Robust solution of salting route optimisation using evolutionary algorithms. In *2006 IEEE Congress on Evolutionary Computation*, pp. 3098-3105.
18. Omer, M. (2007) *Efficient routing of snow removal vehicles*. Master dissertation, College of Engineering and Mineral Resources, West Virginia University.
19. Tagmouti, M., M. Gendreau and J.-Y. Potvin. (2011). A dynamic capacitated arc routing problem with time-dependent service costs. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, Vol. 19, pp. 20-28.
20. Tagmouti, M., M. Gendreau and J.-Y. Potvin. (2010). A variable neighborhood descent heuristic for arc routing problems with time-dependent service costs. *Computers & Industrial Engineering*, Vol. 59, Issue 4, pp. 954-963.
21. Salazar-Aguilar, M. A., A. Langevin, G. Laporte. (2012). Synchronized arc routing for snow plowing operations. *Computers & Operations Research*, Vol. 39, 1432-1440.