

HEURISTIQUE POUR LE PROBLÈME DE TOURNÉES DE VÉHICULES AVEC FLOTTE LIMITÉE ET TRANSPORTEUR EXTERNE

Marie-Claude Bolduc

Jacques Renaud

et

Fayez F. Boctor

Janvier 2006

Document de travail DT-2006-JR-1

Centre de recherche sur les Technologies de l'Organisation Réseau (CENTOR),

Université Laval, Québec, Canada

© *Centor*, 2006

Marie-Claude Bolduc

Jacques Renaud

Fayez F. Boctor

Centre de recherche sur les technologies de l'organisation réseau (CENTOR)
Université Laval, Québec

HEURISTIQUE POUR LE PROBLÈME DE TOURNÉES DE VÉHICULES AVEC FLOTTE LIMITÉE ET TRANSPORTEUR EXTERNE¹

L'utilisation judicieuse d'un transporteur externe peut s'avérer une façon efficace pour réduire les coûts de distribution d'une entreprise ayant une flotte de capacité limitée. Cet article présente une heuristique permettant de planifier des tournées tout en déterminant les clients à servir par l'entremise d'un transporteur externe.

Introduction

La recherche de nouveaux facteurs d'économie de temps et d'argent est, pour les entreprises, au cœur des préoccupations en logistique. Longtemps un élément oublié, le transport a démontré au fil du temps qu'il se doit d'être organisé et planifié afin d'être une source d'amélioration de la productivité. En Amérique du Nord, il existe plusieurs réseaux où un entrepôt doit desservir de nombreux clients souvent à des centaines de kilomètres de distance. Dans plusieurs des cas, ces entreprises possèdent leur propre flotte de véhicules pour desservir les clients les plus près et font affaires avec un transporteur externe pour visiter les clients les plus isolés. Cette façon de faire nous amène à poser certaines questions : Est-il possible de raffiner la décision du choix du transporteur (flotte interne ou flotte externe) pour chacun des clients ? Est-ce que la distance est vraiment l'unique paramètre à prendre en considération dans la décision d'utilisation du transporteur externe ? Est-ce que l'utilisation des deux types de transport pourrait apporter une amélioration de la productivité des réseaux logistiques ?

Dans le cadre de cet article nous étudions un réseau constitué d'un dépôt et de plusieurs clients. Un ou plusieurs produits sont distribués et toutes les unités commandées sont disponibles au dépôt au moment de la planification du transport. Chaque client doit être desservi une et une seule fois soit par la flotte interne soit par un transporteur externe. La flotte interne est composée d'un nombre limité de véhicules homogènes. La capacité des véhicules est déterminée en termes d'unités de produits. Les véhicules ont à la fois un coût fixe d'utilisation et un coût variable dépendant de la distance parcourue. Les coûts de transport à l'externe sont fixés pour chacun des clients en fonction de son positionnement géographique et des quantités demandées.

¹ Les auteurs tiennent à remercier le *Conseil de Recherche en Sciences Naturelles et en Génie du Canada (CRSNG)* de part les subventions OGP0172633 et OPG0036509 pour son support partiel. Ce support est grandement apprécié.

La suite de l'article est divisée comme suit. La prochaine section présente la revue de la littérature. S'enchaînent ensuite la définition formelle du problème et la présentation de l'heuristique développée. Enfin, les problèmes tests sont décrits suivis des résultats et des conclusions.

Revue de la littérature

La littérature scientifique traitant du problème de tournées de véhicules (*Vehicle Routing Problem* – VRP) est prolifique et il serait beaucoup trop long de tenter de la résumer ici. Parmi les revues classiques citons Bodin *et al.* (1983), Laporte (1992a, 1992b et 1993), Laporte & Osman (1995) et les livres de Lawler *et al.* (1985), Golden & Assad (1988) et Toth & Vigo (2002). Parmi les nombreuses méthodes développées, il existe des méthodes exactes (Toth & Vigo, 1998), des heuristiques classiques (Laporte *et al.*, 2000) et diverses métaheuristiques (Gendreau, Laporte & Potvin, 2002, Reimann, Doerner & Hartl, 2004 et Cordeau *et al.*, 2005).

Plus spécifiquement en lien avec la problématique abordée, deux types de problèmes ont été traités dans la littérature : les problèmes de tournées de véhicules avec flotte limitée et les problèmes de tournées de véhicules avec transporteur externe. Quelques auteurs ont étudiés les problèmes de tournées de véhicules avec flotte limitée, notons Gendreau *et al.* (1999), Taillard (1999), Wassan & Osman (2002) et Tarantilis, Kiranoudis & Vassiliadis (2004). Tous ces articles utilisent une flotte limitée hétérogène mais ayant suffisamment de capacité pour desservir l'ensemble des clients. Au niveau des problèmes de tournées de véhicules avec transporteur externe, citons Diaby & Ramesh (1995) dont l'étude porte sur l'utilisation de transporteurs externes et d'une flotte composée d'un seul véhicule. L'objectif était de décider des clients à visiter à l'aide du transporteur externe et d'optimiser la tournée des clients restants. Un réseau plus élaboré que celui de Diaby & Ramesh (1995), i.e. contenant à la fois une flotte limitée hétérogène et un transport externe, est étudié par Chu (2005) et par Bolduc, Renaud & Boctor (2005). La problématique abordée dans cet article implique une flotte interne limitée et homogène avec la possibilité du recours à un transporteur externe.

Définition formelle

Le problème peut être défini formellement sur un graphe $G(V, A)$, où $V = \{0, \dots, n\}$ est l'ensemble des nœuds représentant le dépôt (0) et n clients (1 à n), et A est l'ensemble des arcs reliant les nœuds de V . Une flotte interne de $k = \{1, \dots, K\}$ véhicules homogènes est disponible pour le transport. À chaque client i correspondent respectivement q_i et e_i , la demande et le coût d'utiliser un transporteur externe pour le desservir. Les valeurs c_{ij} et d_{ij} sont associées à chaque arc (i, j) , $i \neq j$, définissant le coût et la distance à parcourir entre le client i et le client j . À chaque véhicule est associé un coût fixe f et une capacité W exprimée en termes de nombre d'unités, de volume ou de poids de produits pouvant être transportées simultanément.

L'objectif est de minimiser les coûts totaux de distribution, soit les coûts fixes et variables de la flotte interne et les coûts du transporteur externe. La solution doit respecter les contraintes suivantes :

- i) Chaque véhicule débute et termine sa tournée au dépôt,
- ii) Chaque véhicule de la flotte interne est assigné à une seule tournée,

Le cadre général de l’heuristique proposée est présenté dans la Figure I. Les étapes ci-dessous décrivent son fonctionnement basé sur les paramètres suivants :

- α : Nombre de répétitions de l’heuristique de construction,
- $[\lambda^-; \lambda^+]$: Bornes de pondération utilisées pour le calcul des économies dans l’heuristique de construction,
- τ : Paramètre déterminant le nombre de permutations à effectuer lors de la perturbation,
- β : Nombre de répétitions de la boucle amélioration-perturbation,
- γ : Nombre de répétitions de la boucle construction-amélioration-perturbation.

Les sections suivantes décrivent en détails chacune des étapes de l’heuristique développée soit la phase de construction, la phase d’amélioration puis, finalement, la phase de perturbation.

Construction d’une solution initiale

L’objectif premier de la phase de construction est de créer des tournées pour la flotte interne lorsque des économies peuvent être réalisées par rapport au coût du transporteur externe. La méthode s’inspire de celle de Clarke & Wright (1964), toutefois les économies sont pondérées par un facteur λ_{ij} tiré aléatoirement entre deux bornes λ^- et λ^+ (Girard, 2005). La procédure de construction des tournées doit prendre en considération le fait que la flotte interne est limitée. Dès lors, tout au long du processus de construction, une validation doit être faite afin de s’assurer de ne pas utiliser plus de véhicules que ceux de la flotte.

La construction commence par une initialisation des tournées créant le plan initial de transport (S). Selon ce plan, tous les clients seront visités par un transporteur externe, engendrant un coût global de

$C = \sum_{i=1}^n e_i$. Partant de S , l’heuristique construit les tournées avec les étapes suivantes :

- a) Calculer les économies ($s_{ij} = d_{i0} + d_{0j} - \lambda_{ij}d_{ij}$, $i \neq j$, $\lambda_{ij} \in [\lambda^-; \lambda^+]$) et les trier en ordre décroissant.
- b) Noter la meilleure économie comme étant s_{ij}^* . Si $s_{ij}^* \leq 0$, la création des tournées se termine, sinon passer à l’étape c.
- c) Si i et j sont le premier ou le dernier client de leur tournée respective, vérifier si les tournées $(0, \dots, i)$ et $(j, \dots, 0)$ peuvent être fusionnées pour devenir une plus longue tournée $(0, \dots, i, j, \dots, 0)$. Ceci peut être fait si un véhicule de la flotte interne peut visiter cette nouvelle tournée. Mettre $s_{ij}^* = 0$ et retourner à l’étape b.

Amélioration des tournées

La phase d'amélioration tente de réduire les coûts de transport en optimisant les tournées de façon individuelle et en échangeant des clients entre les tournées. Une modification n'est appliquée que si elle permet de réduire les coûts tout en aboutissant à une solution réalisable. Les différentes procédures d'améliorations utilisées sont :

- a) *Optimisation individuelle des tournées* : Appliquer l'algorithme d'amélioration appelé 4-opt* (Renaud, Boctor & Laporte, 1996) à chacune des tournées internes.
- b) *Échanges de clients internes/externes* : Ces étapes tentent d'améliorer la solution en insérant un client externe dans l'une des tournées internes, en éjectant un client interne à l'externe ou en échangeant un client interne avec un client externe.
 - i. *Insérer un client externe dans une tournée interne* : Essayer d'insérer chaque client externe i dans chaque position de chacune des tournées internes.
 - ii. *Éjecter un client interne à l'externe* : Essayer de faire visiter le client interne i par un transporteur externe.
 - iii. *Échange interne et externe* : Cette étape tente d'échanger chaque client interne i avec chaque client externe j .
- c) *Échange de clients internes entre les tournées* : Pour chacune des paires de tournées internes, essayer de réduire les coûts totaux en utilisant la méthode 2*-échanges, version restreinte du voisinage 2-interchange d'Osman (1993) qui teste 25 des échanges possibles. Cette méthode est présentée dans la section suivante.

Méthode 2* - échanges

Cette méthode tente d'améliorer la solution en appliquant des échanges entre chaque paire de routes. Les échanges à tester sont présentés à la Figure II. Il s'agit de : 1) transférer un client de l'une des deux routes et l'insérer dans l'autre, 2) permuter deux clients, un de chaque route, 3) échanger deux clients consécutifs d'une route avec un seul de l'autre route, 4) échanger deux clients consécutifs d'une route avec deux clients consécutifs de l'autre route, 5) échanger deux clients séparés par un seul client ou par le dépôt avec deux clients semblables de l'autre route, 6) transférer deux clients consécutifs d'une route à l'autre et 7) transférer deux clients séparés par un seul client ou par le dépôt d'une route à l'autre.

Ces 25 échanges sont fort utiles pour améliorer les tournées, toutefois le nombre d'échanges à tester est important et peu d'entre eux s'avèreront réellement pertinents. Il est donc proposé une façon d'éviter de tester les 25 échanges dans certains cas. Une condition permettant de filtrer les contextes où les échanges ont une forte probabilité d'amélioration a été développée. Cette condition suit le raisonnement suivant. Dans la Figure II, il peut être observé que les arcs (2, 3), (3, 4), (2, 3) et (3, 4) sont ceux qui sont brisés le plus souvent. De plus, un échange sera avantageux si une réduction de la distance totale peut être faite. Plus techniquement, il y aura probablement un gain si l'un des arcs régulièrement brisés est plus long que le plus court des arcs potentiellement ajoutés, i.e. (2, 2), (2, 3), (2, 4), (3, 2), (3, 3), (3, 4), (4, 2), (4, 3) et (4, 4). Par exemple, la Figure III présente le cas où l'arc (2, 3) est plus long que l'arc (3, 3). Les échanges entre ces deux routes seront donc testés puisqu'ils comportent une plus forte probabilité d'amélioration car l'arc (3, 3) sera ajouté et l'arc (2, 3) sera probablement enlevé.

Figure II

Les 25 échanges de la méthode 2*-échanges

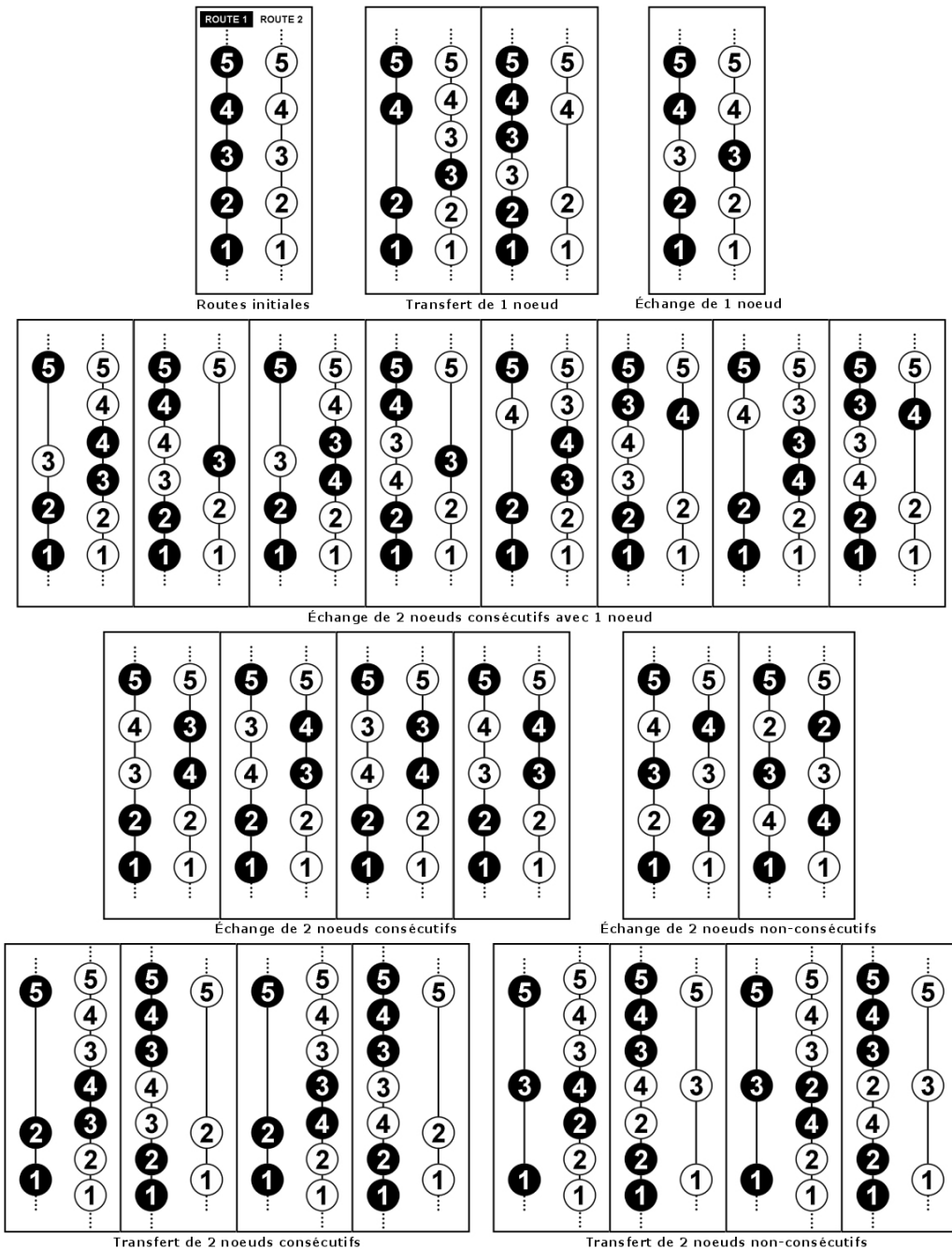
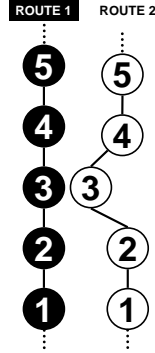


Figure III

Contexte d'échange bénéfique



Mathématiquement, la vérification d'un gain potentiellement positif peut être formulée comme suit :

$$\begin{aligned} &Max(d_{2,3}, d_{3,4}, d_{2,3}, d_{3,4}) \geq \\ &Min(d_{2,2}, d_{2,3}, d_{2,4}, d_{3,2}, d_{3,3}, d_{3,4}, d_{4,2}, d_{4,3}, d_{4,4}) \end{aligned} \quad (1)$$

où $Max(...)$ évalue l'arc le plus long des tournées originales et $Min(...)$ calcule l'arc le plus court parmi les arcs étant les plus souvent ajoutés. Lorsque cette condition est remplie, les 25 échanges de la Figure II sont testés, sinon tous les échanges impliquant ces dix nœuds sont omis. La méthode 2*-échanges permet donc de tester uniquement les échanges potentiellement avantageux, ce qui réduit de beaucoup le nombre de possibilités testées.

Perturbation de la solution

La solution obtenue après l'application de la méthode d'amélioration 2*-échanges est perturbée afin de pouvoir réappliquer la procédure d'amélioration dans l'espoir de trouver une solution de meilleure qualité. Le processus de perturbation fonctionne comme suit.

- a) Sélectionner aléatoirement un client. Trouver son plus proche voisin sur une autre tournée. Échanger ces deux clients. Répéter cette étape $\lceil \tau n \rceil$ fois, où τ est appelé le paramètre de perturbation.
- b) Vérifier la demande totale de chacune des tournées internes. Si la demande d'une route dépasse la capacité W , éjecter des clients choisis aléatoirement jusqu'à ce que la tournée

redevienne réalisable en termes de capacité. Les clients éjectés seront visités par le transporteur externe.

Problèmes tests

Aucun ensemble de problèmes tests impliquant une flotte interne homogène limitée et des transporteurs externes n'existe dans la littérature. Nous avons donc choisi d'adapter les 14 problèmes de Christofides & Eilon (1969) et les 20 problèmes de grande taille de Golden *et al.* (1998). Les coordonnées (x, y) ainsi que les demandes originales ont été conservées. Au niveau de la flotte interne de véhicules homogènes, le coût variable, noté c , est de 1\$/unité de distance parcourue. Le coût fixe de chacun des véhicules, noté f , a été fixé à $c\bar{d}$ (arrondi au 20\$ près) où \bar{d} est la longueur moyenne des tournées de la meilleure solution connue du problème original. Enfin, le nombre de véhicules a été fixé comme étant le plus petit nombre de véhicules permettant de transporter un minimum de 80% de la demande totale. Ainsi, environ 80% de la demande totale pourra être transportée par la flotte interne, tandis que les 20% restant nécessiteront l'utilisation de transporteurs externes.

Le coût du transporteur externe pour chaque client i , noté e_i , est déterminé par $e_i = f/\bar{n} + \varphi_i c d_{0i}$ où \bar{n} est le nombre moyen de clients par tournée selon la meilleure solution connue du problème original, d_{0i} est la distance entre le client i et le dépôt et φ_i est un facteur dépendant de la demande du client i . Ce facteur permet de créer une fonction semblable à celle utilisée par les transporteurs en pratique. La valeur de φ_i dépend de la demande du client i . Soient q_{\min} la plus faible demande, q_{\max} la plus forte et $\delta = (q_{\max} - q_{\min})/3$ alors :

$$\varphi_i = \begin{cases} 1, & \text{si } q_i \in [q_{\min}, q_{\min} + \delta[\\ 1,5, & \text{si } q_i \in [q_{\min} + \delta, q_{\min} + 2\delta[\\ 2, & \text{si } q_i \in [q_{\min} + 2\delta, q_{\max}] \end{cases} \quad (2)$$

Le Tableau 1 présente les caractéristiques des problèmes tests. Les problèmes basés sur Christofides & Eilon (1969) sont baptisés *CEhom* tandis que ceux basés sur Golden *et al.* (1998) sont nommés *Ghom*. Pour chaque problème, le Tableau 1 présente le nombre de clients (n), le nombre de véhicules (K), la capacité des véhicules (W), le coût fixe (f) et le coût variable (c) des véhicules. Ces problèmes tests sont disponibles au http://www.mcbolduc.com/tests_fra.htm.

Tableau 1**Caractéristiques des problèmes tests**

| Tests | <i>n</i> | <i>k</i> | <i>W</i> | <i>f</i> | <i>c</i> | Tests | <i>n</i> | <i>k</i> | <i>W</i> | <i>f</i> | <i>c</i> |
|--------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|--------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| CEhom01 | 50 | 4 | 160 | 120 | 1,00 | Ghom01 | 240 | 7 | 550 | 820 | 1,00 |
| CEhom02 | 75 | 9 | 140 | 100 | 1,00 | Ghom02 | 320 | 8 | 700 | 1060 | 1,00 |
| CEhom03 | 100 | 6 | 200 | 140 | 1,00 | Ghom03 | 400 | 8 | 900 | 1380 | 1,00 |
| CEhom04 | 150 | 9 | 200 | 120 | 1,00 | Ghom04 | 480 | 8 | 1000 | 1720 | 1,00 |
| CEhom05 | 199 | 13 | 200 | 100 | 1,00 | Ghom05 | 200 | 4 | 900 | 1620 | 1,00 |
| CEhom06 | 50 | 4 | 160 | 140 | 1,00 | Ghom06 | 280 | 5 | 900 | 1700 | 1,00 |
| CEhom07 | 75 | 9 | 140 | 120 | 1,00 | Ghom07 | 360 | 7 | 900 | 1460 | 1,00 |
| CEhom08 | 100 | 6 | 200 | 160 | 1,00 | Ghom08 | 440 | 8 | 900 | 1480 | 1,00 |
| CEhom09 | 150 | 10 | 200 | 120 | 1,00 | Ghom09 | 255 | 11 | 1000 | 60 | 1,00 |
| CEhom10 | 199 | 13 | 200 | 120 | 1,00 | Ghom10 | 323 | 13 | 1000 | 60 | 1,00 |
| CEhom11 | 120 | 6 | 200 | 180 | 1,00 | Ghom11 | 399 | 14 | 1000 | 80 | 1,00 |
| CEhom12 | 100 | 8 | 200 | 120 | 1,00 | Ghom12 | 483 | 15 | 1000 | 80 | 1,00 |
| CEhom13 | 120 | 6 | 200 | 260 | 1,00 | Ghom13 | 252 | 21 | 1000 | 60 | 1,00 |
| CEhom14 | 100 | 7 | 200 | 140 | 1,00 | Ghom14 | 320 | 23 | 1000 | 60 | 1,00 |
| | | | | | | Ghom15 | 396 | 26 | 1000 | 60 | 1,00 |
| | | | | | | Ghom16 | 480 | 29 | 1000 | 60 | 1,00 |
| | | | | | | Ghom17 | 240 | 18 | 200 | 40 | 1,00 |
| | | | | | | Ghom18 | 300 | 22 | 200 | 60 | 1,00 |
| | | | | | | Ghom19 | 360 | 26 | 200 | 60 | 1,00 |
| | | | | | | Ghom20 | 420 | 31 | 2000 | 60 | 1,00 |

Résultats

Les résultats obtenus par l'heuristique CAP pour les 34 problèmes tests sont donnés dans le Tableau 2 et sont comparés avec la méthode SRI (Bolduc, Renaud & Boctor, 2005), méthode pouvant être utilisée sur des problèmes avec flotte homogène ou hétérogène. Ces résultats ont été obtenus sur un ordinateur Xeon 3.6 GHz avec 1.00 Go de RAM et utilisant Windows XP. Les heuristiques ont été programmées avec Visual Basic 6.0.

Le Tableau 2 présente, pour chacun des problèmes, la meilleure solution obtenue lors de nos différents essais, les résultats obtenus par la méthode SRI et par l'heuristique CAP. Dans ce tableau, la valeur de la solution, la déviation par rapport à la meilleure solution et le temps de résolution en secondes sont présentés respectivement dans les colonnes Z , % et T . L'algorithme de construction utilise les paramètres $[\lambda^-; \lambda^+] = [0,9; 1,1]$. Les autres paramètres sont $\alpha = 10$, $\beta = 20$ et $\tau = 5\%$. Ces valeurs ont été choisies après plusieurs séries d'essais. Le Tableau 2 présente les résultats pour $\gamma = 5, 10, 30$ et 50 cycles de perturbation.

Tableau 2

Résultats obtenus avec l'heuristique CAP et comparaison avec la méthode SRI

| Meilleure solution connue | SRI | | | | | | CAP | | | | | | | | |
|---------------------------|-----------|-------------|--------------|-----------|-------------|------------|-----------|-------------|------------|-----------|-------------|------------|-----------|-------------|-------------|
| | γ = 5 | | γ = 10 | | γ = 30 | | γ = 50 | | γ = 10 | | γ = 30 | | γ = 50 | | |
| | Z | % | T | Z | % | T | Z | % | T | Z | % | T | Z | % | T |
| CEhom01 | 1 119,47 | 7,19 | 0 | 1 132,91 | 1,20 | 2 | 1 132,91 | 1,20 | 5 | 1 132,91 | 1,20 | 15 | 1 132,91 | 1,20 | 25 |
| CEhom02 | 1 814,52 | 4,18 | 0 | 1 849,02 | 1,90 | 8 | 1 849,02 | 1,90 | 16 | 1 835,76 | 1,17 | 44 | 1 835,76 | 1,17 | 73 |
| CEhom03 | 1 937,23 | 5,84 | 1 | 1 987,32 | 2,59 | 11 | 1 962,94 | 1,33 | 22 | 1 959,65 | 1,16 | 65 | 1 959,65 | 1,16 | 107 |
| CEhom04 | 2 528,36 | 6,58 | 1 | 2 556,55 | 1,11 | 26 | 2 552,13 | 0,94 | 51 | 2 551,05 | 0,90 | 150 | 2 545,72 | 0,69 | 250 |
| CEhom05 | 3 107,04 | 3,91 | 3 | 3 218,09 | 3,57 | 50 | 3 195,25 | 2,84 | 101 | 3 188,79 | 2,63 | 285 | 3 172,22 | 2,10 | 474 |
| CEhom06 | 1 207,47 | 6,25 | 0 | 1 227,90 | 1,69 | 3 | 1 227,90 | 1,69 | 5 | 1 209,62 | 0,18 | 16 | 1 208,33 | 0,07 | 25 |
| CEhom07 | 2 006,52 | 4,28 | 0 | 2 017,23 | 0,53 | 7 | 2 017,23 | 0,53 | 14 | 2 007,63 | 0,06 | 43 | 2 006,52 | 0,00 | 71 |
| CEhom08 | 2 052,05 | 5,42 | 1 | 2 115,31 | 3,08 | 11 | 2 095,41 | 2,11 | 23 | 2 085,53 | 1,63 | 66 | 2 082,75 | 1,50 | 110 |
| CEhom09 | 2 436,02 | 3,73 | 1 | 2 501,73 | 2,70 | 26 | 2 491,13 | 2,26 | 53 | 2 451,61 | 0,64 | 157 | 2 443,94 | 0,32 | 260 |
| CEhom10 | 3 408,99 | 2,99 | 3 | 3 473,20 | 1,88 | 49 | 3 473,20 | 1,88 | 98 | 3 467,23 | 1,71 | 288 | 3 464,90 | 1,64 | 478 |
| CEhom11 | 2 332,21 | 1,87 | 1 | 2 335,81 | 0,15 | 20 | 2 335,81 | 0,15 | 39 | 2 334,23 | 0,09 | 117 | 2 333,03 | 0,04 | 195 |
| CEhom12 | 1 953,55 | 4,30 | 0 | 1 957,07 | 0,18 | 13 | 1 955,10 | 0,08 | 26 | 1 953,55 | 0,00 | 77 | 1 953,55 | 0,00 | 128 |
| CEhom13 | 2 858,94 | 2,00 | 1 | 2 870,30 | 0,40 | 19 | 2 870,30 | 0,40 | 38 | 2 865,86 | 0,24 | 112 | 2 864,21 | 0,18 | 188 |
| CEhom14 | 2 216,68 | 0,18 | 1 | 2 237,08 | 0,92 | 11 | 2 232,50 | 0,71 | 22 | 2 232,50 | 0,71 | 66 | 2 224,63 | 0,36 | 110 |
| Moyenne | | 4,19 | 0,93 | | 1,57 | 18 | | 1,29 | 37 | | 0,88 | 107 | | 0,74 | 178 |
| Ghom01 | 14 160,77 | 3,63 | 4 | 14 510,04 | 2,47 | 66 | 14 417,79 | 1,82 | 133 | 14 398,94 | 1,68 | 394 | 14 388,58 | 1,61 | 651 |
| Ghom02 | 19 244,89 | 4,49 | 9 | 19 644,34 | 2,08 | 123 | 19 597,26 | 1,83 | 242 | 19 542,04 | 1,54 | 712 | 19 505,00 | 1,35 | 1178 |
| Ghom03 | 24 657,98 | 5,63 | 16 | 25 366,51 | 2,87 | 205 | 25 316,40 | 2,67 | 411 | 25 076,80 | 1,70 | 1234 | 24 978,17 | 1,30 | 2061 |
| Ghom04 | 34 618,45 | 4,67 | 27 | 35 939,42 | 3,82 | 302 | 35 454,94 | 2,42 | 604 | 35 033,65 | 1,20 | 1813 | 34 957,98 | 0,98 | 3027 |
| Ghom05 | 14 249,82 | 10,54 | 5 | 14 713,14 | 3,25 | 60 | 14 702,62 | 3,18 | 118 | 14 694,34 | 3,12 | 350 | 14 683,03 | 3,04 | 589 |
| Ghom06 | 21 703,54 | 7,15 | 8 | 22 450,30 | 3,44 | 103 | 22 394,64 | 3,18 | 205 | 22 274,60 | 2,63 | 609 | 22 260,19 | 2,56 | 1021 |
| Ghom07 | 23 564,02 | 7,36 | 13 | 24 467,35 | 3,83 | 163 | 24 297,65 | 3,11 | 329 | 24 115,97 | 2,34 | 985 | 23 963,36 | 1,69 | 1628 |
| Ghom08 | 30 173,53 | 2,41 | 18 | 30 702,44 | 1,75 | 239 | 30 630,69 | 1,52 | 480 | 30 567,27 | 1,30 | 1459 | 30 496,18 | 1,07 | 2419 |
| Ghom09 | 1 336,91 | 3,12 | 4 | 1 356,39 | 1,46 | 80 | 1 355,08 | 1,36 | 159 | 1 352,55 | 1,17 | 501 | 1 341,17 | 0,32 | 832 |
| Ghom10 | 1 598,76 | 3,01 | 8 | 1 615,28 | 1,03 | 127 | 1 614,88 | 1,01 | 256 | 1 612,09 | 0,83 | 777 | 1 612,09 | 0,83 | 1294 |
| Ghom11 | 2 179,71 | 2,70 | 14 | 2 205,24 | 1,17 | 194 | 2 204,64 | 1,14 | 393 | 2 203,63 | 1,10 | 1210 | 2 198,45 | 0,86 | 2004 |
| Ghom12 | 2 503,71 | 3,73 | 17 | 2 537,98 | 1,37 | 289 | 2 531,57 | 1,11 | 584 | 2 521,79 | 0,72 | 1735 | 2 521,79 | 0,72 | 2900 |
| Ghom13 | 2 268,32 | 3,16 | 5 | 2 312,84 | 1,96 | 80 | 2 298,96 | 1,35 | 162 | 2 290,57 | 0,98 | 482 | 2 286,91 | 0,82 | 802 |
| Ghom14 | 2 704,65 | 4,48 | 8 | 2 761,95 | 2,12 | 124 | 2 761,11 | 2,09 | 254 | 2 752,54 | 1,77 | 747 | 2 750,75 | 1,70 | 1251 |
| Ghom15 | 3 171,20 | 3,11 | 12 | 3 230,81 | 1,88 | 191 | 3 228,08 | 1,79 | 382 | 3 218,85 | 1,50 | 1124 | 3 216,99 | 1,44 | 1862 |
| Ghom16 | 3 654,20 | 3,57 | 19 | 3 716,16 | 1,70 | 283 | 3 709,14 | 1,50 | 568 | 3 705,88 | 1,41 | 1688 | 3 693,62 | 1,08 | 2778 |
| Ghom17 | 1 677,22 | 3,31 | 5 | 1 768,75 | 5,46 | 81 | 1 729,24 | 3,10 | 164 | 1 707,56 | 1,81 | 488 | 1 701,58 | 1,45 | 806 |
| Ghom18 | 2 742,72 | 2,88 | 8 | 2 885,23 | 5,20 | 129 | 2 828,66 | 3,13 | 262 | 2 767,31 | 0,90 | 790 | 2 765,92 | 0,85 | 1303 |
| Ghom19 | 3 530,14 | 2,39 | 11 | 3 652,53 | 3,47 | 189 | 3 605,43 | 2,13 | 381 | 3 584,93 | 1,55 | 1144 | 3 576,92 | 1,33 | 1903 |
| Ghom20 | 4 352,95 | 1,99 | 15 | 4 519,99 | 3,84 | 276 | 4 425,19 | 1,66 | 560 | 4 388,96 | 0,83 | 1691 | 4 378,13 | 0,58 | 2800 |
| Moyenne | | 4,17 | 11,30 | | 2,71 | 165 | | 2,06 | 332 | | 1,50 | 997 | | 1,28 | 1655 |
| MOYENNE GENERALE | | 4,18 | 7,03 | | 2,24 | 105 | | 1,74 | 211 | | 1,25 | 630 | | 1,06 | 1047 |

Le Tableau 2 démontre que, pour les petits problèmes (*CEhom*), la méthode SRI a un pourcentage moyen de déviation par rapport à la meilleure solution de 4,19 % avec un temps de résolution moyen de moins d'une seconde. Pour les grands problèmes (*Ghom*), la déviation moyenne de SRI est de 4,17 % en un temps moyen de 11,3 secondes. Pour l'ensemble des 34 problèmes, le SRI procure une déviation moyenne de 4,18 % en 7 secondes en moyenne.

L'heuristique CAP, quoiqu'enregistrant globalement des temps de résolution plus long que la méthode SRI, génère des solutions de meilleure qualité. Ainsi, pour $\gamma = 5$, le pourcentage moyen de déviation pour les petits problèmes est de 1,57 % avec un temps moyen de résolution de 18 secondes. Pour les grands problèmes, le pourcentage moyen de déviation est de 2,71 % avec un temps moyen de résolution de 165 secondes. Pour l'ensemble des 34 problèmes et pour $\gamma = 5$, le pourcentage moyen de déviation est de 2,24 % avec un temps moyen de résolution de 105 secondes. Aussi, avec $\gamma = 50$ cycles, la déviation moyenne sur l'ensemble des problèmes passe à 1,06 % avec un temps moyen de 1 047 secondes. Un bon compromis entre la qualité des solutions et le temps de résolution, est obtenu avec $\gamma = 30$. En effet, sous $\gamma = 30$ la déviation moyenne est de 1,25 % avec un temps moyen de 630 secondes, soit environ 10 minutes.

Conclusion

Cet article a présenté un problème de tournées de véhicules avec une flotte interne de véhicules homogènes et où un transporteur externe était disponible pour visiter les clients. Une heuristique, appelée CAP, permettant de résoudre ce problème est présentée. Cette heuristique a l'avantage de combiner l'optimisation des tournées de la flotte interne et la sélection des clients devant être visités par le transporteur externe. Les phases d'améliorations et de perturbations permettent de faire des échanges de clients entre les tournées en plus de modifier les clients devant être desservis par le transporteur externe.

Le détail des solutions obtenues pour chacun des problèmes démontre que ce ne sont pas forcément les clients les plus éloignés qui doivent être desservis par un transporteur externe. La décision doit tenir compte à la fois de la disponibilité des véhicules, de la proximité et de la demande des clients voisins et des coûts offerts par le transporteur externe. De plus, toujours dans le souci de réduire les coûts de transport au maximum, il est possible que certains clients soient desservis par le transporteur externe même si la capacité de la flotte interne permettrait de les servir. L'utilisation à la fois d'une flotte interne et du transport externe permet non seulement d'obtenir des solutions réalisables dans un contexte où la flotte est limitée, mais donne une flexibilité au réseau logistique.

Références

- Bodin, L., Golden, B., Assad, A. & Ball, M. "Routing and scheduling of vehicles and crews. The state of the art." *Computers & Operations Research*, 10, 2, Special Issue, 1983, 63-211.
- Bolduc, M.-C., Renaud, J. & Boctor, F.F. "The Routing and Carrier Selection Problem." Working paper, Network Organization Technology Research Center (CENTOR), Faculté des sciences de l'administration, Université Laval, Québec, 2005.

- Christofides, N. & Eilon, S. "An Algorithm for the Vehicle-Dispatching Problem." *Operations Research*, 20, 1969, 309-318.
- Chu, C.-W. "A heuristic algorithm for the truckload and less-than-truckload problem." *European Journal of Operational Research*, 165, 2005, 657-667.
- Clarke, G. & Wright, J.W. "Scheduling of vehicles from a central depot to a number of delivery points." *Operations Research*, 12, 1964, 568-581.
- Cordeau, J.-F., Gendreau, M., Hertz, A., Laporte, G. & Sormany, J.-S. "New heuristics for vehicle routing problem." Dans *Logistics Systems: Design and Optimization* (Eds A. Langevin & D. Riopel), Springer, 2005, 279-297.
- Diaby, M. & Ramesh, R. "The Distribution Problem with Carrier Service: A Dual Based Penalty Approach." *ORSA Journal on Computing*, 7, 1, 1995, 24-35.
- Gendreau, M., Laporte, G., Musaraganyi, C. & Taillard, E.D. "A tabu search heuristic for the heterogeneous fleet vehicle routing problem." *Computers & Operations Research*, 26, 1999, 1153-1173.
- Gendreau, M., Laporte, G. & Potvin, J.-Y. "Metaheuristics for the capacitated vehicle routing problem." Dans *The Vehicle Routing Problem*, P. Toth & D. Vigo (eds), SIAM Monographs on Discrete Mathematics and Applications, Philadelphia, 2002, 129-154.
- Girard, S. "Résolution de problèmes de tournées de véhicules par perturbation." Mémoire de maîtrise, Faculté des sciences de l'administration, Université Laval, Québec, 2005.
- Golden, B.L. & Assad, A.A. (eds) "Vehicle routing: Methods and Studies." Elsevier Science Publishers B. V., North-Holland, 1988.
- Golden, B.L., Wasil, E.A., Kelly, J.P. & Chao, I. "The impact of metaheuristics on solving the vehicle routing problem: algorithms, problem sets, and computational results." Dans T.G. Crainic, G. Laporte (Eds.), *Fleet Management and Logistic*, Kluwer Academic Publisher, Boston (MA), 1998, 33-56.
- Laporte, G. "The Traveling Salesman Problem: An overview of exact and approximate algorithms." *European Journal of Operational Research*, 59, 1992a, 231-247.
- Laporte, G. "The Vehicle Routing Problem: An overview of exact and approximate algorithms." *European Journal of Operational Research*, 59, 1992b, 345-358.
- Laporte, G. "Recent algorithmic Developments for the traveling salesman problem and the vehicle routing problem." *Ricerca Operativa*, 23, 68, 1993, 5-27.
- Laporte, G., Gendreau, M., Potvin, J.-Y. & Semet, F. "Classical and modern heuristics for the vehicle routing problem." *International Transactions in Operational Research*, 7, 2000, 285-300.
- Laporte, G. & Osman, I.H. "Routing Problems: A Bibliography." *Annals of Operations Research*, 61, 1995, 227-262.
- Lawler, E.L., Lenstra, J.K., Rinnooy Kan, A.H.G. & Shmoys, D.B. "The traveling salesman problem. A guided tour of combinatorial optimisation." John Wiley & Sons, 1985.
- Osman, I.H. "Metastrategy simulated annealing and tabu search algorithms for the vehicle routing problem." *Annals of Operations Research*, 41, 1993, 421-451.
- Reimann, M., Doerner, K. & Hartl, R.F. "D-Ants: Savings Based Ants divide and conquer the vehicle routing problem." *Computers and Operations Research*, 31, 2004, 563-591.
- Renaud, J., Boctor, F.F. & Laporte, G. "A fast composite heuristic for the symmetric traveling salesman problem." *INFORMS Journal on Computing*, 8, 2, 1996, 134-143.
- Taillard, E.D. "A heuristic column generation method for the heterogeneous fleet VRP." *RAIRO*, 33, 1, 1999, 1-14.
- Tarantilis, C.D., Kiranoudis, C.T. & Vassiliadis, V.S. "A threshold accepting metaheuristic for the heterogeneous fixed vehicle routing problem." *European Journal of Operational Research*, 152, 1, 2004, 148-158.
- Toth, P. & Vigo, D. "Exact solution of the Vehicle Routing Problem." Dans *Fleet Management and Logistics*, eds. Crainic T.G. & Laporte G., Kluwer, Boston, 1998, 1-31.

Toth, P. & Vigo, D. (eds) "The Vehicle Routing Problem." SIAM Monographs on Discrete Mathematics and Applications, Philadelphia, 2002.

Wassan, N.A. & Osman, I.H. "Tabu search variants for the mix fleet vehicle routing problem." *Journal of the Operational Research Society*, 53, 2002, 768-782.