

STABILITE ET REORGANISATION DE TOURNEES DE COLLECTE DES DECHETS MENAGERS

F.BANIEL⁽¹⁾⁽²⁾, M.J. HUGUET⁽²⁾, T.VIDAL⁽³⁾

⁽¹⁾LGP – ENIT
47 avenue d'Azereix
F-65000 Tarbes

⁽²⁾LAAS-CNRS
Université de Toulouse
7 av du colonel Roche
F-31077 Toulouse

⁽³⁾IRISA-INRIA,
Campus de Beaulieu
F-35042 Rennes

frederique.baniel@enit.fr, huguet@laas.fr, thierry.vidal@irisa.fr

RESUME : *L'organisation de la collecte des déchets ménagers est un problème central pour les collectivités locales qui en ont la charge. Il fait partie de la famille des problèmes de transport et plus précisément des problèmes de tournées de véhicules qu'il convient d'adapter à un ensemble d'exigences particulières qui sont difficiles à concilier : qualité de service, réduction des coûts, impact environnemental, équilibrage des collectes, etc. Notre travail s'intéresse à l'organisation des tournées de collecte et plus précisément à leur évolution dynamique lors de l'intégration de nouveaux lieux de collecte. A partir d'une étude menée au sein d'une collectivité locale, nous nous sommes centrés sur deux types de critères d'évaluation des tournées de collecte : ceux liés aux coûts et ceux concernant la stabilité des différentes tournées face aux évolutions des secteurs à collecter. Nous présentons dans cet article le problème de collecte que nous avons étudié et sa modélisation mathématique. Puis nous exposons les méthodes que nous avons utilisées pour le traitement de l'aspect dynamique des tournées de collecte et nous donnons les premiers résultats que nous avons obtenus.*

MOTS-CLES : *collecte des déchets, problèmes de tournées de véhicules dynamiques avec fenêtres temporelles, stabilité, méthodes de recherche locale.*

1. INTRODUCTION

Le travail que nous présentons concerne l'organisation et l'évolution des tournées de collecte des déchets ménagers. Pour mieux appréhender ce vaste domaine, nous nous appuyons sur un partenariat avec une collectivité locale de la région toulousaine. Cela nous permet d'avoir des problèmes concrets et de connaître la réalité du terrain. Dans un souci de généralisation, nous nous appuyons également sur un partenariat avec l'ADEME (Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie) dont l'un des domaines de compétence est celui des déchets (ADEME, 1998). Le but de la collectivité locale est de proposer un service de collecte en minimisant les coûts de collecte et les impacts environnementaux, en respectant les réglementations sur les conditions de travail de ses salariés et en offrant une bonne qualité de service aux usagers.

Le plus souvent, les collectivités gèrent les collectes de déchets par jour de collecte. Pour cela, elles sont contraintes par des éléments fixes comme : la fréquence de collecte de chaque usager (2 fois par semaine dans notre cas) ; la flotte de véhicules (nombre de véhicules et capacité de chacun) ; la localisation des points de dépôt et de vidage ; etc.

Une des spécificités de la collectivité étudiée est de devoir s'adapter à une augmentation du nombre

d'utilisateurs relativement importante (+2% par an). Ces évolutions de population se traduisent en pratique par des variations de quantité à collecter ou par l'apparition de nouveaux secteurs de collecte, ce qui peut aller jusqu'à nécessiter la mise en place de nouvelles collectes. Cependant, dans un souci d'efficacité de la collecte et de qualité de service, la collectivité souhaite limiter les changements lors de la mise en place des nouvelles collectes.

Le travail que nous menons a pour but de lui permettre de s'adapter de manière efficace aux différentes variations des secteurs de collecte tout en limitant l'impact de la mise en place des nouvelles collectes.

2. PROBLEME DE COLLECTE DES DECHETS

Le problème de collecte des déchets consiste à concevoir un ensemble de tournées à moindre coût en partant d'un dépôt et en allant à un centre de vidage tout en passant par un ensemble d'utilisateurs à collecter. Le critère d'optimisation concerne généralement la distance totale parcourue, mais on rencontre également : le nombre de véhicules utilisés, le temps total de parcours, l'équilibrage de charge entre les véhicules etc.

Ce problème a déjà fait l'objet de nombreux articles basés sur des cas réels. Dans la littérature, les problèmes de collecte de déchets sont modélisés soit en considérant

la collecte sur les arcs (modèle de type Capacited Arc Routing Problem CARP) (Ramdane-cherif, 2002), (Bautista et Pereira, 2004), soit en considérant la collecte sur les nœuds (modèle de type Vehicle Routing Problem ou VRP) (Kulcar, 1996), (Nuortio et al., 2006), (Tung et and Pinnoi, 2000). Il existe également une modélisation intégrant les deux approches (Prins et Bouchenoua, 2005) en proposant de collecter sur les arcs et sur les nœuds.

Dans cette étude, nous allons considérer de manière agrégée des ensembles de points de collecte qui sont toujours collectés simultanément (un lotissement par exemple). Ce regroupement de points de collecte était une demande de la collectivité locale qui souhaite avoir une vision agrégée de ses collectes. Ainsi, la modélisation avec collecte sur les nœuds (VRP) s'est avérée la plus adaptée à notre travail.

La modélisation classique du VRP ne suffit pas à définir l'ensemble de notre problème, il nous faut également nous intéresser aux différentes extensions proposées.

Les problèmes de collecte peuvent comporter des contraintes de capacité (Capacited Vehicle Routing Problem ou CVRP), c'est-à-dire que lors du passage du véhicule, celui-ci collecte une quantité de produits et le total des quantités collectées doit être inférieur à la capacité du véhicule. Ils peuvent de plus être soumis à des contraintes de fenêtre de temps (Vehicle Routing Problem with Time Windows ou VRPTW) (Tan et al., 2001) lorsque le passage du véhicule pour un ou plusieurs lieux de collecte est contraint par une fenêtre horaire définie. Selon les articles de la littérature, les flottes de véhicules utilisées pour la collecte peuvent être homogènes ou hétérogènes. Le problème qui nous intéresse comporte à la fois des contraintes de capacités sur les véhicules et des contraintes de fenêtres temporelles, il est noté habituellement CVRPTW.

Dans certaines études sur la collecte des déchets on trouve une autre extension du VRP : le PVRP (Periodic Vehicle Routing Problem), (Chu et al., 2006). Cette extension consiste à déterminer sur un horizon les dates de visite d'un nombre de clients connaissant apriori le nombre de fois que le client doit être visité. Dans notre cas chaque habitant va être collecté 2 fois par semaine mais les jours de collecte sont déjà fixés. Cette extension à des problèmes périodiques ne concerne donc pas notre étude pour le moment.

Enfin, dans cette étude nous nous intéressons à l'aspect évolutif des tournées de collecte afin de prendre en compte les nouvelles caractéristiques des zones à collecter. Ce problème est appelé DVRP (Dynamic Vehicle Routing Problem) (Larsen, 2000, Housroum et al., 2006). Le DVRP est l'une des extensions récemment ajoutées aux VRP. L'aspect dynamique du problème de tournées de collecte peut être lié à l'apparition d'aléas lors du déroulement des tournées (variation des temps de trajet, variation sur les quantités) ou à l'apparition de

nouvelles informations (nouveaux lieux à desservir). Le point qui nous concerne dans ce papier est celui de l'apparition de nouveaux points de collecte.

Dans notre cas, le problème étudié est faiblement dynamique : la plupart des points de collecte sont déjà connus et intégrés à une tournée et le nombre de nouveaux points à traiter est relativement faible. De plus, dans notre cas, il n'y a pas d'aspect temps réel à prendre en compte car nous avons le temps d'intégrer les nouvelles informations.

Cet aspect évolutif des collectes est couplé à un objectif de stabilité dans le déroulement des collectes. La stabilité vise dans cette étude à limiter les changements dans les collectes existantes dans un souci de qualité de service vis-à-vis des usagers et d'efficacité pour les équipes en charge de la collecte. Ainsi, nous ne pouvons envisager de recalculer complètement les tournées de collecte lors de l'apparition de nouveaux points car cela pourrait produire de nouvelles tournées très éloignées des tournées existantes et risquerait, par exemple, de dégrader le service aux usagers (changement des heures de collecte par exemple).

3. PROBLEME ETUDIE

3.1. Organisation des collectes

La collectivité étudiée regroupe plusieurs communes se trouvant en périphérie de Toulouse. Les tournées qu'elle effectue ont été obtenues de façon empirique et sont réalisées commune par commune. Chaque foyer est collecté deux fois par semaine en ordures ménagères classiques (le lundi et le jeudi, ou le mardi et le vendredi) et une fois le mercredi en sélectif. Pour le moment nous n'allons nous intéresser qu'à la collecte des ordures ménagères classiques. Dans la suite de l'article, on appellera indifféremment tournée ou circuit le trajet devant être effectué par un véhicule (et une équipe) un jour donné.

Les contraintes du problème sont les suivantes :

- collecter toutes les habitations sachant que certaines d'entre elles sont limitées par des plages horaires (par exemple pour les établissements scolaires, ou bien pour éviter les zones de trafic dense aux heures de pointes),
- respecter les capacités maximales de chaque véhicule (la flotte de véhicules est hétérogène),
- respecter le nombre de véhicules disponibles,
- respecter le temps de travail de chaque équipe par journée de collecte (toutes les équipes doivent respecter le même temps de travail).

En pratique, les véhicules partent tous du même dépôt et terminent les trajets au point de vidage des véhicules (centre de transfert des déchets). Les véhicules retournent ensuite du vidage au dépôt.

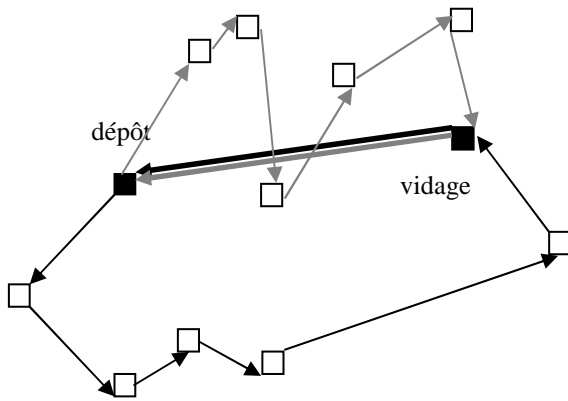


Figure 1. Schéma de deux tournées pour un jour de collecte.

De plus, le taux de présentation des bacs étant inférieur en fin de semaine, les tournées du jeudi et du vendredi doivent être considérées séparément de celles du début de semaine. Ceci permet de diminuer le nombre de camions à sortir en fin de semaine et donne plus de flexibilité pour les jours de repos des chauffeurs-rippers.

3.2. Objectifs de la collecte

Pour notre collectivité locale, il existe quatre enjeux principaux dans le domaine de la collecte des déchets : un enjeu économique, un enjeu environnemental, un enjeu de qualité de service et enfin un enjeu social.

L'enjeu économique ou coût de transport va être limité dans cette étude à la distance totale parcourue par les véhicules, c'est-à-dire au kilométrage effectif des véhicules. Les enjeux environnementaux peuvent être liés dans notre cas à la consommation de carburant et au respect des normes en vigueur. Les objectifs de qualité de service peuvent être vus comme liés au respect des plages horaires définies pour la collecte de certains lieux. En ce qui concerne les enjeux sociaux nous considérerons un critère d'équilibrage des tournées. Ce critère cherche à équilibrer les circuits de collecte en termes de charge de travail (tonnage à collecter, temps de travail, nombre de bacs à collecter et temps en haut-le-pied, c'est-à-dire temps de jonction entre deux zones de collectes) et de pénibilité du circuit (nombre de points de collecte et nombre de « points noirs » du circuit de collecte, nécessitant par exemple des manœuvres particulières). Dans cet article seul le critère de coût de transport (distance totale parcourue) va être conservé. Les autres critères (consommation de carburant, équilibrage, respect des fenêtres temporelles) serviront d'indicateurs pour évaluer les tournées a posteriori.

Pour étudier l'aspect dynamique des tournées de collecte nous introduisons la notion de **stabilité** entre deux ensembles de tournées de collecte. La stabilité mesurera l'écart entre une solution courante de collecte et une nouvelle solution de collecte.

Dans ce travail, la stabilité des tournées de collecte peut être définie à deux niveaux :

- un niveau de stabilité « statique » qui doit permettre de minimiser des écarts entre les tournées de début de semaine et celles de fin de semaine. Cette stabilité « statique » peut être abordée du point de vue des usagers et/ou des employés. Elle est dite statique car elle n'est pas liée à l'apparition de nouvelles informations sur les collectes à réaliser.
- un niveau de stabilité « dynamique » qui doit permettre de mesurer les différences entre les tournées courantes et les nouvelles tournées calculées pour faire face à des variations de population. Cette stabilité « dynamique » peut également être abordée du point de vue des usagers et/ou des employés.

Dans cet article nous allons considérer la stabilité uniquement au niveau « dynamique ». Pour cela nous allons construire deux ensembles de collectes : un ensemble de points correspondant aux collectes du lundi/jeudi et un ensemble de points correspondant aux collectes du mardi/vendredi en supposant à chaque fois que les deux jours de collecte de chacun de ces ensembles de points de collecte sont identiques. La stabilité statique fera l'objet d'autres études.

La stabilité dynamique de tournées de collecte peut être étudiée du point de vue des usagers ou du point de vue des employés. Pour les usagers, nous considérons que la stabilité sera mesurée par les écarts sur les dates effectives de ramassage des bacs. Pour les employés, la stabilité sera évaluée en considérant les variations sur les ensembles de points à collecter pour chaque véhicule et en considérant les variations de trajet pour chaque véhicule.

Nous allons ainsi nous intéresser au couplage entre un critère traduisant un coût de collecte et un critère représentant la stabilité dynamique.

4. MODELISATION

Dans cette étude, nous utiliserons une modélisation avec collecte sur les nœuds (de type VRP) pour pouvoir considérer certains ensembles d'habitations de manière agrégée. Ainsi, nous allons travailler sur un ensemble de « points agrégés » de collecte et sur un ensemble de routes reliant ces différents points que nous allons représenter par un graphe orienté, noté $G = (Y, A)$.

$-Y = \{y_0, y_2, \dots, y_{n-1}\}$ est l'ensemble des N sommets du graphe représentant les points agrégés de collecte : $(y_{\text{dépôt}} = y_0)$ représente le dépôt et $(y_{\text{vidage}} = y_1)$ représente le point de vidage. On notera par la suite Y' l'ensemble $Y - \{y_{\text{dépôt}}, y_{\text{vidage}}\}$.

- $A = \{(y_i, y_j) | y_i, y_j \in Y; i \neq j\}$ est l'ensemble des arcs orientés du graphe.

L'horizon d'étude de notre problème est d'une semaine, à l'intérieur de cet horizon il y a 2 groupes de collecte : $h \in H = \{h1, h2\}$.

On notera par la suite :

$K = \{1, \dots, m\}$: l'ensemble des véhicules.

Q^k : la capacité maximale par véhicule $k \in K$.

T : le temps de travail journalier.

q_i^h : la quantité à collecter sur un nœud y_i pour le jour h .

$[est_i^h, lft_i^h]$: la fenêtre temporelle du nœud y_i le jour h .

Cette fenêtre fournit une date de début de collecte au plus tôt et une date de fin de collecte au plus tard.

t_i^{hk} : le temps de collecte du nœud y_i par le véhicule k le jour h

c_i : la distance associée au parcours du nœud y_i .

p_i^{hk} : le nombre de « points noirs » existant dans le nœud y_i pour le véhicule k le jour h . Un point noir représente une difficulté sur le parcours (par exemple un carrefour très emprunté, un demi-tour, ...). Ces points noirs augmentent sensiblement la pénibilité pour le chauffeur-ripper.

t_{ij}^k : le temps de parcours de l'arc (y_i, y_j) par le véhicule k que l'on supposera indépendant du jour.

c_{ij}^k : la distance de traversée de l'arc (y_i, y_j) pour le camion k .

Variables de décision

A chaque nœud on associe une variable notée y_i^{hk} qui représente les nœuds à collecter par jour et par véhicule. Cette variable est binaire : elle vaut 1 si le nœud y_i est collecté le jour h par le camion k et 0 sinon.

On peut noter que le nœud dépôt et le nœud de vidage sont les mêmes pour tous les véhicules chaque jour :

$$y_0^{hk} = y_{dépôt} = 1 \text{ et } y_1^{hk} = y_{vidage} = 1, \forall (k \in K; h \in H).$$

Pour tous les autres nœuds, il va y avoir 2 variables de décision par camion correspondant chacune d'entre elles à un groupe de collecte différent : y_i^{h1k} et y_i^{h2k} .

On peut également définir une variable de décision x_{ij}^{hk} qui représente l'utilisation de l'arc (y_i, y_j) par un véhicule k le jour h . Cette variable est binaire :

elle sera égale à 1 si le véhicule k va du nœud y_i au nœud y_j le jour h et 0 sinon.

Dans ce papier, st_i^{hk} représente la date de début effective de la collecte par un véhicule un jour donné.

Contraintes

Les contraintes de notre problème de tournées de véhicules avec contraintes de capacité sur les véhicules, contraintes de limitation de temps de travail et contraintes de fenêtres de temps sur les nœuds (CVRPTW) sont :

$$x_{ij}^{hk} \in \{0,1\} \quad (1)$$

$$\sum_{i=1}^n x_{ij}^{hk} = y_j^{hk} \quad (j = 2, \dots, n; k \in K; h \in H) \quad (2)$$

$$\sum_{j=2}^n x_{ij}^{hk} = y_i^{hk} \quad (i = 2, \dots, n; k \in K; h \in H)$$

$$\sum_{i \in Y'} t_i^{hk} \cdot y_i^{hk} + \sum_{i \in Y'} \sum_{j \in Y'} x_{ij}^{hk} \cdot t_{ij}^k \leq T \quad (k \in K; h \in H) \quad (3)$$

$$\sum_{i \in Y'} q_i^{hk} \cdot y_i^{hk} \leq Q^k \quad (k \in K; h \in H) \quad (4)$$

$$\sum_{(i,j) \in s^2} x_{ij}^{hk} \leq |S| - 1 \quad (S \subset Y'; 2 \leq |S| \leq n-1; k \in K; h \in H) \quad (5)$$

$$y_i^{hk} \times est_i^h \leq y_i^{hk} \cdot st_i^{hk} \leq y_i^{hk} \times (lft_i^h - t_i^{hk}) \quad (i = 1, \dots, n; k \in K; h \in H) \quad (6)$$

$$st_i^{hk} + t_i^{hk} + t_{ij}^k - M \times (1 - x_{ij}^{hk}) \leq st_j^{hk} \quad (i = 1, \dots, n; j = 2, \dots, n; k \in K; h \in H) \quad (7)$$

L'équation (1) représente la contrainte de binarité sur la variable de décision. Les équations (2) représentent la contrainte de continuité du circuit : si on passe par un nœud, alors il y a un et un seul arc qui entre dans ce nœud et un et un seul arc qui en sort. On peut remarquer que y_i^{hk} vérifie la propriété de binarité du fait de la binarité de x_{ij}^{hk} . L'équation (3) spécifie le respect du temps de travail par jour pour chaque tournée. L'équation (4) limite le tonnage à collecter à la capacité totale du camion. L'équation (5) est la contrainte classique d'interdiction des sous-tours : elle garantit de récupérer un seul circuit connexe et non plusieurs sous-circuits disjoints. Et enfin les équations (6) et (7) concernent le respect des fenêtres temporelles définies pour certains nœuds (tous les nœuds n'en possèdent pas forcément). La contrainte (7) traduit les contraintes de précedence entre deux nœuds de collecte consécutifs avec M représentant une grande valeur.

Pour adapter le modèle à notre problème nous avons ajouté des contraintes sur les nœuds. Notamment pour prendre en compte la répartition des collectes en deux

groupes. Nous introduisons une variable binaire y_i^h valant 1 si le nœud y_i est collecté le jour h et 0 sinon pour écrire ces équations. Ainsi :

$$y_i^h = \sum_{k \in K} y_i^{hk} \quad (h \in H) \quad \forall i \neq 1,2 \quad (9)$$

Nous avons alors les contraintes de répartition des collectes suivantes :

$$y_i^{h1k} + y_i^{h2k} = 1, \forall y_i \in Y' \quad (10)$$

$$y_0^h = m(h \in H) \quad (11)$$

$$y_1^h = m(h \in H)$$

Les équations (10) nous permettent de gérer la séparation des collectes en deux groupes : Si on collecte le nœud le lundi/jeudi alors il ne sera pas collecté le mardi/vendredi. Enfin les équations (11) caractérisent le dépôt et le vidage car contrairement aux autres nœuds, ces deux nœuds particuliers sont « visités » par tous les véhicules pendant la journée de travail. Chaque tournée part du dépôt, décharge ses déchets au point de vidage en fin de collecte et revient en fin de journée de travail au dépôt.

Critères

La fonction critère que nous cherchons à minimiser est composée de trois parties : une première (12) concerne le coût, une deuxième partie (13) concerne la stabilité dynamique du point de vue des usagers et une troisième partie (14) concerne la stabilité dynamique vu des employés.

Le critère de coût retenu vise à minimiser la distance totale des tournées de collectes. Il s'exprime par :

$$\left(\sum_{i \in Y'} \sum_{j \in Y'} \sum_{k \in K} \sum_{h \in H} c_{ij}^k \cdot x_{ij}^{hk} + \sum_{i \in Y'} \sum_{k \in K} \sum_{h \in H} c_i^{hk} \cdot y_i^{hk} \right) \quad (12)$$

Le critère de stabilité dynamique vu des usagers peut s'exprimer comme le fait de minimiser l'écart entre les dates de début des deux groupes de collectes :

$$\sum_{i \in Y'} \sum_{k \in K} \left(st_i^{h1k} \right) - \left(st_i^{*h1k} \right) + \sum_{i \in Y'} \sum_{k \in K} \left(st_i^{h2k} \right) - \left(st_i^{*h2k} \right) \quad (13)$$

où st_i^{hk} représente la date de début de collecte du nœud y_i par le véhicule k le jour h dans la solution courante (celle actuellement appliquée) et st_i^{*hk} représente cette même information dans la nouvelle solution.

Du point de vue des employés de la collectivité locale, la stabilité dynamique des tournées peut s'exprimer de deux façons :

- (a) minimiser l'écart entre les nœuds collectés par un même véhicule sur deux tournées différentes dans la même semaine :

$$\sum_{i \in Y'} \sum_{k \in K} \left(y_i^{h1k} \right) - \left(y_i^{*h1k} \right) + \sum_{i \in Y'} \sum_{k \in K} \left(y_i^{h2k} \right) - \left(y_i^{*h2k} \right) \quad (14)$$

où y_i^h représentant les nœuds collectés par le véhicule k le jour h dans la solution courante et y_i^{*h} la même information dans la nouvelle solution.

- (b) minimiser les changements sur l'ordre de collecte des nœuds entre deux tournées. Pour évaluer ces changements nous allons rechercher pour chaque nœud commun aux deux tournées (courante et nouvelle) le nombre de nœuds différemment placés.

5. METHODES DE RESOLUTION UTILISEES

Dans cette partie nous présentons brièvement les méthodes que nous avons utilisées pour construire une solution initiale à notre problème de collecte de déchets et pour gérer l'apparition de nouveaux points de collecte. L'objectif de notre travail de recherche étant orienté sur l'étude de l'aspect dynamique des tournées, nous nous sommes limités pour la recherche de tournées initiales à l'utilisation de méthodes gloutonnes et à voisinage classiques.

Pour obtenir une solution initiale à notre problème de tournées de collecte, nous avons besoin de construire deux groupes de tournées : celui correspondant aux tournées du lundi/jeudi et celui correspondant aux tournées du mardi/vendredi. Nous devons aussi construire l'ensemble des tournées pour chacun de ces deux groupes. Nous avons choisi de résoudre ces deux sous problèmes (séparation en deux groupes et construction de tournées) de manière séquentielle en débutant par la séparation en deux groupes (ou clusters).

5.1. Séparation en clusters

Pour séparer nos points de collecte en clusters nous nous basons sur l'emplacement du point de dépôt et du point de vidage et nous cherchons à équilibrer la charge entre les clusters. De plus, les points collectés dans chaque cluster doivent être assez proches afin de permettre aux équipes de s'entraider en cas de problème sur une des tournées de collecte. Ainsi, pour obtenir chaque cluster nous sommes partis de deux points géographiquement éloignés de l'axe dépôt/vidage. Nous ajoutons ensuite à chaque cluster des points voisins. Les deux clusters sont construits simultanément de manière à être équilibrés en termes de tonnage. Ensuite, ces clusters sont améliorés par une recherche locale basée sur la notion d'écartement dans un graphe.

Ce découpage en clusters nous donne les nœuds à collecter le lundi/jeudi et ceux à collecter le mardi/vendredi. Nous devons ensuite construire les tournées sur chacun de ces clusters.

5.2. Construction des circuits de collecte

5.2.1. Construction d'une première solution

Pour construire un ensemble initial de tournées de collecte, nous avons d'abord utilisé un algorithme glouton, à savoir l'algorithme d'insertion de *Solomon* (Solomon, 1987) défini pour le VRPTW. Cet algorithme permet d'ajouter un nœud dans une tournée en construction en utilisant des critères d'insertion prédéfinis. Ces critères nous donnent une évaluation de la meilleure insertion pour tous les nœuds du réseau restant à insérer et de choisir le nœud qui s'insère le mieux à la tournée. Notre stratégie est de sélectionner le nouveau nœud à insérer de façon à ce qu'il ait une bonne insertion dans la tournée en construction et qu'il soit éloigné du point de vidage. Il existe deux types d'utilisation de l'algorithme d'insertion de *Solomon* :

- une insertion de type séquentiel qui construit les tournées les unes après les autres,
- et une insertion de type parallèle qui construit les tournées en même temps.

Nous avons choisi d'appliquer à chaque cluster de notre réseau global l'algorithme d'insertion parallèle. Nous obtenons ainsi des tournées plus équilibrées en termes de charge et mieux réparties sur le territoire.

5.2.2. Amélioration des circuits de collecte

Pour améliorer une solution initiale ou pour gérer l'apparition de nouveaux points de collecte, nous utilisons des méthodes de recherche locale usuelles pour les problèmes de VRPTW telles que or-opt et λ -interchange.

La méthode à voisinage or-opt (Or, 1976) permet d'améliorer la tournée devant être réalisée par un véhicule donné. Le voisinage exploré consiste à changer de place de 1 à 3 nœuds au sein d'une même tournée.

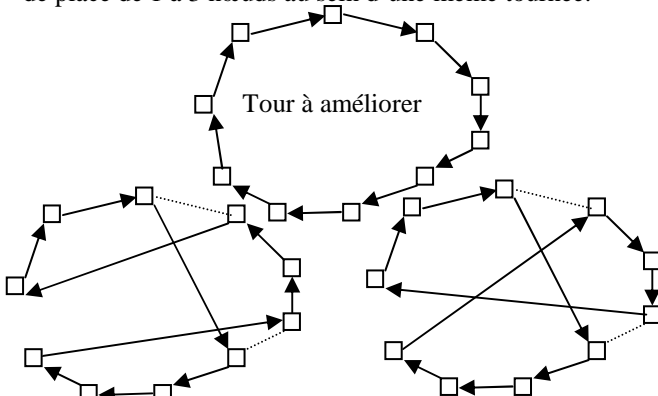


Figure 2. Méthode or-opt

La méthode à voisinage λ -interchange (Laporte, Semet, 1999) permet d'échanger des nœuds entre deux circuits donnés. Le voisinage exploré permet d'échanger au plus 2 nœuds entre deux tournées.

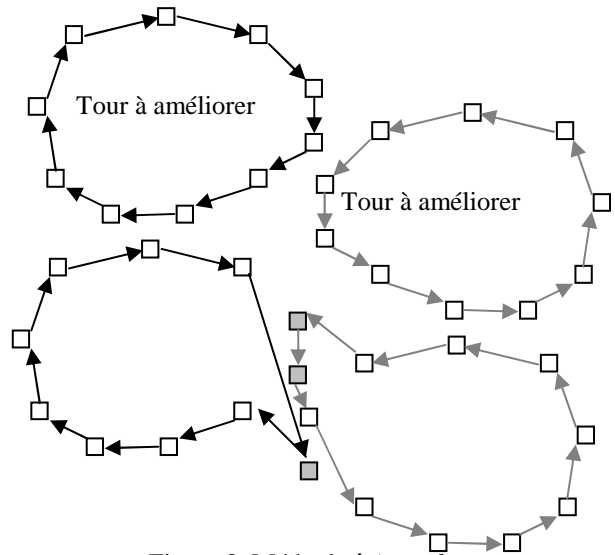


Figure 3. Méthode λ -interchange

Cet échange de points est limité à des circuits dits « proches ». Pour quantifier la proximité entre deux circuits nous nous appuyons sur l'existence (ou non) d'au moins un chemin direct entre les nœuds des deux tournées considérées.

Les méthodes présentées dans cette partie sont utilisées soit pour générer une solution initiale à notre problème de VRPTW soit pour prendre en compte l'apparition de nouveaux points de collecte comme cela est exposé par la suite. En ce qui concerne la résolution du problème de VRPTW, il existe de nombreuses méthodes plus performantes (Bräysy et Gendreau, 2005a, 2005b) que celles présentées ici, nous nous sommes limités dans cet article à la présentation des méthodes que nous avons exploitées pour gérer l'aspect dynamique de nos tournées de collecte.

6. EVOLUTION DES TOURNEES

Dans cette nouvelle partie, nous allons étudier l'aspect dynamique de nos tournées de collecte en nous basant sur les méthodes de recherche locale exposées dans la partie précédente.

6.1. Méthodes d'intégration de nouveaux points de collecte

Pour analyser les différentes possibilités d'intégration de nouveaux nœuds dans une collecte existante, nous avons procédé à deux types d'expérimentations :

- la première expérimentation consiste à ajouter un seul nouveau point de collecte de tonnage faible (c'est-à-dire un nœud à visiter en plus) pour que celui-ci s'insère à un circuit de façon à ne pas dépasser le tonnage maximal,
- la deuxième expérimentation consiste à ajouter plusieurs nouveaux points de collecte à une tournée de façon à ce que la tournée affectée par ces ajouts ne puisse plus respecter la contrainte de capacité du véhicule.

Pour la première expérimentation, nous avons comparé cinq méthodes d'intégration :

- I1 : nous ajoutons le nœud dans le circuit où se trouve le nœud le plus proche du nœud à insérer (Plus Proche Voisin). Le nouveau nœud s'insère juste après le nœud qui lui est le plus proche.
- I2 : nous appliquons I1 et nous optimisons le circuit modifié à l'aide de la méthode *or-opt*.
- I3 = I1 + interchange en se limitant aux tournées « proches » de celle affectée par l'insertion et situées dans le même cluster + *or-opt* sur les tournées modifiées.
- I4 = I1 + interchange sur tous les circuits (proches 2 à 2) et situés dans le même cluster que celle affectée par l'insertion + *or-opt* sur les tournées modifiées.
- I5 : nous réorganisons l'ensemble des tournées pour le cluster affecté par l'ajout d'un nouveau nœud en repartant de zéro (*calcul de solution initiale à l'aide de l'heuristique de Solomon puis amélioration à l'aide de or-opt et de λ -interchange.*)

Dans toutes ces méthodes d'intégration de points de collecte nous nous interdisons de faire migrer des points d'un cluster à un autre car cela est considéré comme très pénalisant par la collectivité locale. Cependant d'autres expérimentations devront être menées pour évaluer de telles migrations pour certains points de collecte.

Pour la deuxième expérimentation, les deux premières méthodes évoquées ci-dessus (I1 et I2) ne sont plus adaptées puisque, dans ce cas, le tonnage de la tournée affectée devient trop important. Nous n'avons donc comparé que les trois dernières méthodes présentées ci-dessus (I3, I4 et I5).

6.2. Expérimentations

Pour tester nos différentes méthodes d'intégration de nouveaux points de collecte, nous avons également utilisé des instances de Solomon de 100 nœuds.

Nous proposons de comparer les résultats des méthodes d'intégration sur les deux critères retenus : le coût, évalué par distances totale parcourue par les véhicules et la stabilité dynamique, évaluée sur trois volets. Les trois volets de la stabilité sont :

- La somme des écarts sur les dates de début de collecte des différents nœuds entre les tournées courantes et les tournées calculées (*Ecart Temps*),
- La somme des écarts pour chaque tournée sur les nœuds collectés entre chaque nouvelle tournée par rapport à la tournée courante (*Ecart Nœuds*),
- La somme des écarts dans les trajets effectués entre chaque tournée courante et les nouvelles tournées (pour un nœud se trouvant dans la même tournée avant et après évolution des

données, nous calculons le nombre de nœuds qui sont toujours dans la même tournée mais qui sont maintenant placés différemment, soit il était placé avant dans la solution courante et se retrouve après dans la solution calculée, ou inversement) (*Ecart Chainage*).

6.3. Résultats

6.3.1. Première expérimentation

Sur le problème à 50 nœuds, la solution initiale a un coût (distance) de 931. Après ajout d'un point de collecte de capacité relativement faible nous obtenons les résultats ci-dessous pour les différentes méthodes d'intégration :

	Distance	Stabilité		
		Ecart nœuds	Ecart temps	Ecart chaînage
I1	967	1	178	0
I2	967	1	178	0
I3	967	1	178	0
I4	967	1	178	0
I5	892	34	1685	98

Tableau 1. Résultats de la première expérimentation pour le premier problème

Pour le deuxième problème à 226 nœuds la solution initiale a un coût de 1317. La première expérimentation consiste à ajouter de 2 nœuds de faible tonnage. Cet ajout ne va affecter qu'une seule tournée. Nous obtenons les résultats suivants :

	Distance	Stabilité		
		Ecart nœuds	Ecart temps	Ecart chaînage
I1	1344	1	306	0
I2	1344	1	306	0
I3	1344	1	306	0
I4	1340	7	406	16
I5	1312	47	2603	127

Tableau 2. Résultats de la première expérimentation pour le deuxième problème

Nous avons également testé sur des instances de Solomon à 100 nœuds en enlevant un nœud au problème de départ et en le rajoutant pour étudier l'aspect dynamique décrit plus haut :

	Instances de Solomon	Distance	Stabilité		
			Ecart nœuds	Ecart temps	Ecart chaînage
I1	C1	1216	1	166	0
	R1	1431	1	16	0
	RC1	1617	1	5	0
I2	C1	1216	1	166	0
	R1	1431	1	16	0
	RC1	1617	1	5	0
I3	C1	1216	1	166	0
	R1	1431	1	16	0
	RC1	1617	1	5	0
I4	C1	1216	1	166	0
	R1	1429	3	245	13
	RC1	1617	1	5	0
I5	C1	1188	35	16293	148
	R1	1432	25	1680	63
	RC1	1566	19	1205	62

Tableau 3. Résultats de la première expérimentation pour les instances de Solomon

A l'aide de ces premiers résultats, nous remarquons que les première, deuxième et troisième réorganisations ne sont pas différenciées. En effet, en ce qui concerne I1 et I2 le nœud est directement inséré à la bonne place, et I3 ne permet pas d'obtenir une meilleure solution. Par contre I4 nous donne une meilleure distance totale des circuits, mais une moins bonne stabilité.

Nous pouvons également remarquer, que sur cet exemple, la stabilité que nous obtenons pour I5 est moins bonne que celle obtenue pour les autres réorganisations.

Cette première expérimentation nous montre que pour l'insertion d'un petit nombre de nœuds correspondant à un tonnage pouvant être absorbé par une tournée la méthode I1 permet de garder une bonne stabilité des tournées, et la méthode I4 fournit une meilleure solution en termes de coût mais dégrade le critère de stabilité.

6.3.2. Deuxième expérimentation

Pour mener à bien la deuxième expérimentation nous avons inséré 3 points de collecte dans le premier problème et 4 points de collecte dans le deuxième problème. Dans les deux cas, l'ensemble des points ajoutés sont proches d'une seule et même tournée. L'insertion de ces nouveaux points doit conduire à réorganiser les tournées les unes par rapport aux autres en raison de dépassement de capacité sur certains véhicules de collecte.

Les tableaux ci-dessous donnent les résultats obtenus pour les méthodes d'intégration de points I3, I4 et I5 pour chacun des problèmes étudiés.

	Distance	Stabilité		
		Ecart nœuds	Ecart temps	Ecart chaînage
R3	15800	5	1330	9
R4	15200	5	2000	15
R5	17700	37	4050	14

Tableau 4. Résultats de la deuxième expérimentation pour le premier problème (coût initial 14200)

	Distance	Stabilité		
		Ecart nœuds	Ecart temps	Ecart chaînage
R3	18295	11	4321	70
R4	17671	45	23710	673
R5	18004	99	35808	876

Tableau 5. Résultats de la deuxième expérimentation pour le deuxième problème (coût initial 18128)

Nous avons également testé sur les instances de Solomon citées plus haut en enlèvement 3 nœuds au problème de départ de façon à ce que quand ces derniers sont ajoutés au circuit le plus proche, ils en font dépasser la capacité :

	Instances de Solomon	Distance	Stabilité		
			Ecart nœuds	Ecart temps	Ecart chaînage
I3	C1	1277	10	5308	29
	R1	1413	5	335	6
	RC1	1769	8	1251	7
I4	C1	1277	10	5308	29
	R1	1403	8	415	14
	RC1	1769	8	1251	7
I5	C1	1188	58	15977	165
	R1	1353	62	2513	88
	RC1	1615	117	3384	94

Tableau 6. Résultats de la première expérimentation pour les instances de Solomon

La réorganisation I4 donne une meilleure évaluation en termes de distance, par rapport à la I3 et I5. Elle donne également une meilleure évaluation que la méthode I5 en ce qui concerne la stabilité. La méthode I3 ne domine pas I5 puisque pour le deuxième exemple I5 donne une meilleure évaluation du critère de coût qu'I3. I4 ne domine pas non plus I3 puisque le critère de stabilité a une moins bonne évaluation pour I4 que pour I3.

Sur ce problème, les méthodes I3 et I4 s'avèrent pertinentes et conduisent à privilégier soit le coût soit la stabilité des tournées.

7. CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Dans ce papier, nous avons décrit le problème de collecte des déchets ménagers d'une collectivité locale de la région toulousaine et nous avons présenté la modélisation mathématique de ce problème.

Dans le cadre des tournées dynamiques, nous nous sommes intéressés à l'insertion de nouveaux points de collecte et nous avons exposé une première étude sur les critères de stabilité pouvant être utilisés pour comparer deux solutions de collecte. Puis nous avons présenté différentes méthodes d'intégration de nouveaux points de collecte. Ces méthodes se basent sur des méthodes de recherche locale classiques pour le problème de tournées de véhicules considéré.

Ces différentes méthodes d'insertion de points de collecte ont été testées sur des premiers exemples afin de mieux cerner leurs pertinences. Les résultats préliminaires nous montrent que le choix d'une méthode d'intégration va être lié à l'impact que provoque l'ajout de nouveaux points de collecte (respect ou non de la capacité des véhicules suite à l'ajout de points). Des expérimentations plus poussées doivent être menées afin d'affiner ces premiers résultats.

Une des premières suites de ce travail pourrait être l'exploitation d'une méta-heuristique plus performante pour le problème considéré (CVRPTW) comme par exemple un algorithme génétique. Cela permettrait d'améliorer la qualité des solutions obtenues par les méthodes d'intégration de points de collecte.

Pour la suite de cette étude, nous envisageons de poursuivre notre travail sur le critère de stabilité en prenant notamment en compte la stabilité « statique » définie précédemment. Il pourrait également être intéressant de considérer les circuits globalement sur les deux clusters de façon à autoriser des échanges de points entre clusters afin d'améliorer l'ensemble des tournées de manière plus globale.

REFERENCES

- ADEME, 1998. Gestion des déchets ménagers et assimilés : transport et logistique
- Bautista, J. and Pereira, J., 2004. Ant Algorithms for Urban Waste Collection Routing. *Lecture Notes in Computer Science (3172)*, pages 302-309.
- Bräysy O., Gendreau, M., 2005a. Vehicle routing problem with time windows, part I: Route Construction and Local Search Algorithms. *Transportation Science*, 39, 104-118.
- Bräysy O., Gendreau, M., 2005b. Vehicle routing problem with time windows, part I: Metaheuristics. *Transportation Science*, 39, 104-118.
- Chu F., N. Labadi et C. Prins, 2006. A scatter search for the periodic capacitated arc routing problem, *European Journal of Operational Research*, 169(2), p. 586-605.
- Housroum, H., Hsu, T., Dupas, R., Goncalves, G., 2003. Une approche évolutionniste du problème de la gestion dynamique de tournées de véhicule avec fenêtres de temps. *CPI'03, Meknès, Maroc*.
- Kulcar, T., 1996. Optimizing solid waste collection in Brussels. *European Journal of operational Research* 90 71-72.
- Laporte, G., Semet, F., 1999. Classical heuristics for the vehicle routing problem. *Cahier du GERAD*, G-98-54.
- Nuortio, T., Kytöjoki, J., Niska, H. And Bräysy, O., 2006. Improved route planning and scheduling of waste collection and transport. *Expert Systems with Applications* 30 223-232.
- Or, I., 1976. Travelling Salesman type combinatorial problems and their relation to the logistics of blood banking. PhD Dissertation. Department of industrial Engineering and Management Science, Northwestern University, Evanston, IL.
- Prins, C., Bouchenoua, S., 2005. A memetic Algorithm Solving the VRP, the CARP and General Routing problems with Nodes, Edges and Arcs, Recent advances in memetic algorithms, W.Hart et al. (éd.), *Studies in Fuzziness and Soft Computing* 166, p.65-85, Springer.
- Ramdane-cherif, W., 2002. Problèmes d'optimisation en tournées sur les arcs, *Thèse à l'université de technologie de Troyes*.
- Solomon, MM. , 1987. Algorithms for the vehicle routing and scheduling problems with time window constraints, *Operations Research* 35(2) : 254-65.
- Tan, K.C., Lee, L.H., Zhu, K.Q. and Ou, K. 2001. Heuristics Methods for Vehicle Routing Problem with Time Windows. *Artificial Intelligent in Engineering*, pp. 281-295
- Tung, D. V. and Pinnoi, A., 2000. Vehicle routing-scheduling for waste collection in Hanoi, *European Journal of Operational Research*, 125 449-468.