

Approche de résolution distribuée du problème de distribution de soins de santé à domicile

ANA MARIA ANAYA ARENAS^{1,2}, THIBAUD MONTEIRO³, CARLOS RODRIGUEZ VERJAN⁴, ANGEL RUIZ^{1,2}

^{1,2} CIRRELT ET FACULTE DES SCIENCES DE L'ADMINISTRATION, UNIVERSITE LAVAL
Pavillon Palasis Prince, Université Laval, 2325, rue de la Terrasse, Québec, Canada, G1V 0A6

anamaria.anayaarenas@cirrelt.ca et angel.ruiz@fsa.ulaval.ca

LASPI, IUT DE ROANNE

20 avenue de Paris 42334 Roanne cedex – France

thibaud.monteiro@univ-st-etienne.fr

⁴ CENTER FOR HEALTH ENGINEERING - LSTI, ECOLE NATIONALE SUPERIEURE DE MINES DE SAINT ETIENNE

158, Cours Fauriel, 42023 Saint-Etienne cedex 2, France

carlosrodver@gmail.com

Résumé – Cet article propose une nouvelle méthode de résolution du problème combiné de localisation / routage de véhicules (LRP) qui s'appuie sur une approche de décisions distribuées. Cette méthode utilise une estimation de l'impact des tournées lors de la définition de la localisation des entrepôts et, de manière réciproque, les informations de localisation sont utilisées pour construire les différentes tournées. La contribution essentielle de ce travail réside dans l'interaction régissant les deux problèmes de décision. Celle-ci permet d'obtenir : (1) une localisation qui anticipe sur la qualité des tournées qui en découlent et (2) une définition de l'ensemble des tournées qui contribue au choix de localisation des dépôts. Une première comparaison de cette nouvelle démarche sur des instances connues de la littérature confirme l'intérêt et le potentiel de cette nouvelle approche.

Mots clés - Distribution d'aide humanitaire, Processus décisionnel distribué, Localisation, Tournées de véhicules.

Abstract - This paper proposes a new method based on a distributed decision approach to solve the location-routing problem (LRP). This method uses a routing estimation to locate depots and then the locations information to design the routes. The main contribution of this approach lays on the specific way in which the interactions between the location and the routing problems are managed, allowing (1) depot location decisions that anticipate the behaviour or the quality of the expected routes that will be built during the routing part and (2) a routing part that influences the choice of depots. Preliminary results on well-known instances in the literature confirm the potential of this new approach.

Keywords – Distribution of relief supplies, distributed decision process, location, routing.

1 Introduction

Les décisions concernant la définition de tournées de véhicules et de la localisation des installations sont d'une importance primordiale pour les phases de conception et de fonctionnement des systèmes de transport et de distribution. La littérature scientifique s'intéressant aux problématiques de localisation ou de routage est très vaste. Cependant, les contributions qui traitent simultanément ces deux décisions sont plutôt rares. Traditionnellement, les modèles fonctionnent indépendamment. Les approches de la localisation-allocation (LAP) ont été utilisées pour des décisions stratégiques d'implantation, tandis que les modèles de tournées de véhicules (VRP) ont été appliqués au niveau tactique pour définir les décisions de routage. Toutefois, il est clair que la qualité du choix des emplacements et la performance des décisions de routage sont fortement interdépendantes et les résultats obtenus par un processus décisionnel non intégré sont sous-optimaux [Salhi et Rand, 1989].

Les modèles combinant des problèmes stratégiques et tactiques appelés « location-routing » (LR) visent à considérer simultanément le problème de l'emplacement des installations et les décisions de routage. Cependant, malgré le fait que ces modèles intègrent à la fois le point de vue stratégique et le point de vue tactique, la plupart des approches de résolution

issues de la littérature sont fondées sur une décomposition du problème conduisant à résolution en deux phases. Dans la première phase, le problème de l'implantation des sites est résolu, sans tenir compte des problèmes de routage. La deuxième phase optimise le problème de routage sous contraintes des emplacements des installations définis par la première phase. Ainsi, un tel processus décisionnel propose des résultats encore sous-optimaux, car cette démarche néglige, encore une fois, une grande partie de la relation entre les deux types de décisions. En effet, ce processus adopte une approche hiérarchique pure qui accorde une importance plus élevée aux décisions d'implantations que les décisions de routage. Ainsi, plus le ratio entre le coût du LAP et du VRP est élevé, moins une telle approche hiérarchique est performante. Notre approche s'inscrit aussi dans ce cadre classique de décomposition pour résoudre les problèmes de LR. Cependant, il vise à atténuer l'inconvénient découlant du processus de décision purement hiérarchique par la mise en œuvre d'une approche itérative et interactive entre les deux composantes du problème. Appliquée au problème LR, notre approche de résolution se base sur un échange d'informations entre les deux problèmes à résoudre. Lors de la définition des lieux d'implantation des sites, certaines informations partielles ou approchées sur les itinéraires envisageables sont utilisées. Inversement, le processus de décision permet de changer ou de

modifier les décisions de localisation-allocation lors du sous-processus de prise de décision de routage si ces modifications permettent d'obtenir de meilleurs itinéraires.

L'approche de résolution distribuée que nous présentons ici est utilisée pour résoudre le problème d'organisation de soins de santé à domicile avec plusieurs possibles applications réels. Les structures de santé à domiciles sont des solutions intéressantes pour les services de soins qui peuvent être mobiles comme le suivi de la maternité [Germain et al., 2008], la vaccination et même certaines prises en charge oncologiques. Dans ce contexte, on doit choisir un ensemble d'établissements de santé qui soutiendront les activités des professionnels de santé, et on doit concevoir les tournées de visite de ces professionnels aux domiciles des patients. Les professionnels organisent le planning de visites de leurs patients en cherchant à minimiser le coût/durée totale du trajet tout en respectant des contraintes structurelles et organisationnelles.

Cette application présente des caractéristiques spécifiques qui rendent les méthodes traditionnelles, comme le p-médian ou la couverture maximale, inadéquats. En effet, les conditions d'accessibilité aux domiciles des patients, le manque de ressources humaines et un souci d'équité, entre autres, rendent ce problème particulier. Par exemple, dans le contexte présent de rarefaction et de disponibilité de professionnels de santé, il est extrêmement important d'optimiser, non seulement des coûts financiers, mais aussi différents indicateurs de performances (kpi) comme le temps de service, la distance totale à parcourir, le nombre de véhicules nécessaires ou le nombre de tournées à réaliser. Par conséquent, la mise en œuvre efficace du concept de système de santé à domicile exige à la fois une implantation pertinente des sites et une organisation optimale des différentes tournées de visites des patients.

Dans le but d'évaluer l'approche de résolution distribuée proposée, nous avons utilisé le benchmark de Prins et al. [Prins et al., 2004]. Même avec les modèles les plus simples de résolution du LAP et du VRP, l'approche distribuée est en moyenne à 2,72% des meilleurs résultats connus en terme de coût total et, en certains cas, améliore notablement ces meilleurs résultats.

Cet article est structuré de la manière suivante. La section 2 contient une recension des approches classiques du problème de localisation et de routage est proposé. Dans la section 3, les détails de l'approche sont présentés. Les grandes lignes du processus d'implémentation de notre approche sont présentées dans la section 4. Enfin, en section 5, les résultats obtenus sont comparés avec les éléments de littérature et une conclusion globale est donnée à la section 6.

2 État de l'art

Nous commençons cette section en adressant le problème de routage. L'analyse du problème de tournées de véhicules est très largement traitée dans la littérature. Nous citons volontairement le travail de Gendreau et al. [Gendreau et al., 1996] dans lequel les heuristiques, les métaheuristiques et les différents types de problèmes de VRP sont traités.

Quant au problème de localisation, un état de complet du problème de localisation dans le contexte de la santé a été réalisé par Rahman et Smith [Rahman et Smith, 2000].

Au mieux de notre connaissance, il n'y a pas une littérature traitant spécifiquement l'organisation des systèmes de production de soins délocalisés ou, en d'autres mots, soins à domicile. Toutefois, certains travaux se sont concentrés sur cette problématique. Par exemple, le travail de Murawski et

Church [Murawski et Church, 2009] s'intéresse au problème de l'accessibilité saisonnière des infrastructures routières dans la région du Suhum au Ghana. Dans le travail de Harper et al. [Harper et al., 2005], les informations géographiques (comme la disponibilité et l'accès des chemins en temps de pluie), les différents types de services et de demandes sont intégrés dans un modèle de planification du système de santé. Dans le contexte de la santé, un état de l'art traitant du problème de localisation peut être trouvé dans le travail de Nagy et Salhi [Nagy et Salhi, 2007]. Les auteurs proposent une classification des problèmes suivant trois catégories : les problèmes déterministes, stochastiques et hiérarchiques. La méthode présentée dans leur travail s'appuie sur un modèle hiérarchique et déterministe.

Les travaux proposant des méthodes de résolution du problème de localisation et de routage peuvent être classés en trois approches principales : modèles intégrés, les méthodes séquentielles, et les méthodes itératives. Dans les approches basées sur des modèles intégrés, les deux problèmes sont traités en même temps. Cela mène à des modèles complexes et très difficiles à résoudre et, en pratique, cette approche ne peut être appliquée qu'à des problèmes de petite taille. Dans les méthodes séquentielles, le choix d'implantation des sites est réalisé dans une première phase et le problème de tournées est résolu par la suite. Enfin, dans les méthodes itératives, le choix d'implantation des sites est réalisé dans une première phase, le problème de tournées est résolu et une démarche itérative est utilisée pour améliorer la solution globale et faire interagir les deux sous-problèmes. Pour rendre cette démarche efficace, il est important de connaître les conséquences des choix de localisation des sites sur la performance des différentes tournées qui en découlent. Cela est nécessaire pour définir des techniques de diversification des solutions pour explorer au mieux un espace de recherche relativement vaste. La démarche que nous présentons dans cette communication s'inscrit dans cette troisième catégorie, car nous cherchons à améliorer une solution courante en exploitant à la fois des informations issues des deux sous-problèmes.

Srivastava [Srivastava, 1993] propose une approche qui peut être classée parmi les méthodes séquentielles. La phase de localisation des sites est réalisée en premier à l'aide d'un modèle LAP comme le p-médian [Rolland et al., 1997], [Teixeira et Antunes, 2008] ou d'une approche qui cherche à optimiser la couverture. Ensuite, le problème de tournées est résolu. Ces méthodes sont appropriées dans la construction d'un réseau en milieu urbain, alors que le coût de localisation et plus important que le coût des tournées et l'effet d'assigner un patient à une localisation ou une autre est négligeable. Comme il n'y a pas d'informations échangées entre le modèle LAP et le modèle VRP, la phase de détermination des localisations ignore le routage et inversement.

Les méthodes dites intégrés encapsulent en un seul modèle les informations du VRP et du LAP. Le modèle obtenu ainsi est complexe et difficile à résoudre. Ces méthodes ne sont utilisables que pour certaines instances et pour certains types de problèmes. Le principal inconvénient de ces approches réside dans la très grande quantité d'informations à traiter. Un exemple est apporté par le travail de Melechivský et al [Melechivský et al., 2005] qui ont proposé de prendre en compte des coûts non linéaires. Les auteurs utilisent un algorithme de recherche tabu pour résoudre leur modèle.

Enfin, les méthodes itératives sont caractérisées par les échanges successifs d'informations entre les deux sous-modèles qui permettent d'orienter la recherche de solution vers une solution ayant la meilleure performance globale. Nagy et

Salhi [Nagy et Salhi, 1996] proposent un modèle itératif. La solution courante est améliorée suivant la procédure de Weiszfeld en localisant les sites suivant le centre de gravité des groupes de clients à visiter.

3 Approche de décision distribuée

La méthode de décision distribuée que nous proposons est basée sur le travail de Schneeweiss [Schneeweiss, 2003]. Le problème est constitué par deux niveaux de décision, un niveau supérieur (localisation) et un niveau inférieur (routage). La fonction objective du niveau supérieur contient une estimation de la performance qui peut être obtenue au niveau inférieur. De cette façon, des informations issues du niveau inférieur peuvent être incluses dans le processus décisionnel maître. De la même façon, le niveau inférieur prend aussi en compte des éléments issus du problème maître pour, par exemple, favoriser ou défavoriser certains choix de routage. Le processus itératif et interactif est arrêté en utilisant un critère d'arrêt global tel que le nombre d'itérations, le temps d'exécution ou encore d'autres critères mesurant l'amélioration (ou manque d'amélioration) relative entre itérations successives. La Figure 1 montre l'organigramme de l'approche de décision distribuée pour la résolution combinée de la localisation et du routage.

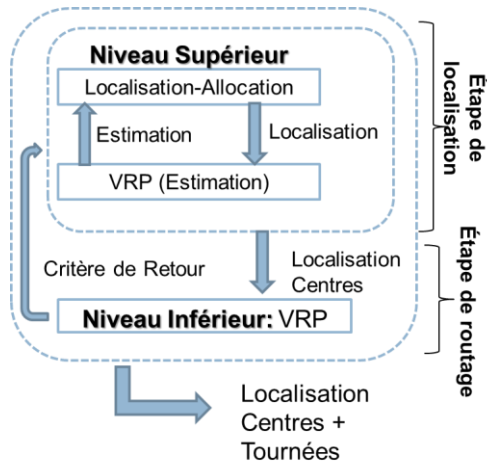


Figure 1 : Méthode distribuée pour résolution combinée de la localisation et du routage.

Cette approche utilise implicitement le principe de l'heuristique de réduction de l'espace de recherche (Restricted Search Space heuristic) de Pecora, Ruiz et Soriano [Pecora et al., 2008]. Dans ce principe, la première étape est utilisée pour restreindre l'espace de recherche à un sous-espace susceptible de contenir de bonnes solutions. La seconde étape est alors utilisée pour explorer ce sous-espace afin d'y trouver des solutions pertinentes.

Le principal avantage de cette approche distribuée est que le décideur n'est pas dans l'obligation d'avoir, à un instant donné, toutes les informations du problème pour prendre sa décision. Les informations peuvent être réparties dans des entités plus réduites. De la même façon, les décisions peuvent être prises avec des horizons de décisions différents et un degré dans le détail des informations disparates. C'est ainsi qu'il n'est pas nécessaire de connaître, en détail, les tournées lors de la phase de localisation des dépôts. Seule une estimation est requise. L'apport de ce travail est souligné par le fait qu'une grande quantité d'informations spécifiques peuvent être intégrées à des degrés divers de granularité. Ces informations pouvant caractériser les spécificités des systèmes de santé déployés.

Dans le niveau supérieur de décision (problème maître), les sites sont choisis parmi un ensemble de centres potentiels et les patients (clients) sont affectés à l'un d'entre eux. À cette étape, l'objectif inclut une estimation de la taille de tournées afin d'anticiper sur la qualité des tournées qui seront déterminées dans la seconde phase du processus décisionnel. Cette estimation est basée sur la distance entre le client et le centre multipliée par 100. La précision de cette estimation dépend de plusieurs facteurs, mais en particulier, elle est très sensible au nombre de clients assignés au centre. D'autres estimations peuvent être intégrées comme le risque d'occurrence de catastrophes sanitaires dans une région, des données historiques ou des considérations de superficie des zones. Le premier niveau est aussi une étape de réduction de l'espace de recherche. Il vise à établir un sous-espace qui contient potentiellement de bonnes solutions. La seconde phase constitue le niveau inférieur de décision et comporte un ensemble de sous-problèmes de type VRP où les séquences des visites des patients sont véritablement établies. Dans les paragraphes suivants, nous décrivons l'étape de localisation, celle de routage et le critère de retour permettant l'interaction entre les deux parties du problème.

Problème de localisation : Soient a_i la demande du client i , b_j la capacité du centre de services j (le plus souvent, les centres de services sont nommés dépôts dans la littérature), c_j le coût fixe lié à l'ouverture du centre j , et d_{ij} le coût (ou la distance) du transport en le client i et le centre ou client j . Le problème de localisation, ou problème maître, peut être formulé comme suit :

$$\text{Objectif : Min : } \sum_{j \in J} c_j X_j + \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} d_{ij} Y_{ij}$$

Sous les contraintes :

$$\sum_{i \in I} a_i Y_{ij} \leq b_j X_j, \quad \forall j \in J \quad (1)$$

$$\sum_{j \in J} Y_{ij} = 1, \quad \forall i \in I \quad (2)$$

$$X_j \geq Y_{ij}, \quad \forall j \in J, \forall i \in I \quad (3)$$

$$X_i = \{0,1\}, \quad \forall i \in I \quad (4)$$

$$Y_{ij} = \{0,1\}, \quad \forall j \in J \quad (5)$$

La première partie de la fonction objective correspond au coût de location ou ouverture des centres de services. La seconde partie de cette fonction permet de prendre en compte une estimation du coût des tournées potentielles. La contrainte (1) exprime le respect de la limite de capacité des centres. La contrainte (2) permet de s'assurer de l'affectation des clients de l'unicité de celle-ci. La contrainte (3) établit le fait qu'un client ne peut être affecté qu'à un centre ouvert. Les équations (4) et (5) indiquent que toutes les variables de ce modèle sont binaires.

Problème de routage : Soient F_k le coût fixe lié à l'utilisation de la tournée k (déploiement d'un professionnel) et d_{ij} la distance (ou le coût) pour voyager entre le point i et le point j . La variable X_{ijk} vaut 1 si le client i est affecté au centre j et est desservi par la tournée (ou le professionnel) k . Alors, le problème du niveau inférieur (routage) est modélisé comme suit :

$$\text{Objectif Min : } \sum_{k \in K} F_k \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} X_{ijk} + \sum_{k \in K} \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} d_{ij} X_{ijk}$$

Sous les contraintes :

$$\sum_{k \in K} \sum_{i \in I} X_{ijk} = 1, \quad \forall j \in J \quad (6)$$

$$\sum_{i \in I} a_i \sum_{j \in J} X_{ijk} \leq Q_k \quad (7)$$

$$U_{ik} - U_{jk} + N X_{ijk} \leq N - 1, \quad \forall i, j \in J, \forall k \in K \quad (8)$$

$$\sum_{i \in I \cup J} X_{ijk} - \sum_{i \in I \cup J} X_{jik} = 0, \quad \forall k \in K, \forall i \in I \cup J \quad (9)$$

$$X_{ijk} = \{0,1\}, \quad \forall i \in I, \forall j \in J, \forall k \in K \quad (10)$$

$$U_{ik} \geq 0, \quad \forall i \in I \cup J, \forall k \in K \quad (11)$$

La première partie de la fonction objective correspond au total des coûts fixes de la tournée k . La seconde partie représente le coût des tournées définies. La contrainte (6) permet de garantir qu'un client est affecté à une et une seule tournée. La contrainte (7) permet de garantir le respect de la capacité maximale (Q_k) de la tournée k . Cette contrainte peut aussi bien exprimer de limites quant au temps de la journée de travail comme à la distance totale parcourue. La contrainte (8) garantit l'élimination des sous-tournées. Et finalement, la contrainte (9) vérifie la conservation des flux aux différents sommets du graphe.

Boucle de retour : La phase séquentielle de la méthode termine lorsque cette seconde étape du processus est réalisée. La démarche itérative reprend la phase de localisation en incluant des informations issues de la phase précédente de routage. Plusieurs types d'information sont susceptibles d'être utilisés pour modifier les décisions au niveau de la localisation, selon les intérêts ou les priorités du décideur. Par exemple, on pourrait s'intéresser à des éléments structuraux de la solution courante et, en particulier, au taux d'utilisation de la capacité des centres ou des routes. Si l'on observe trop de capacité non utilisée (par rapport à l'itération précédente ou par rapport à un seuil établi) cela pourrait indiquer qu'un nombre trop important de centres ont été ouverts et que ce nombre doit être limité lors de la prochaine itération de l'étape de localisation. On pourrait également s'intéresser à l'évolution du coût de routage par rapport au coût d'établissement des dépôts. Selon cette approche, un coût de routage grandissant indiquerait une augmentation des distances à parcourir et donc que plus de dépôts semblent nécessaires. Enfin, on pourrait aussi former un critère basé sur l'efficacité des dépôts (rapport entre le coût d'un dépôt et la demande qu'il satisfait). Ainsi, une fois que toutes les tournées sont établies, les dépôts sont classés en fonction de leur efficacité et, au cours de l'itération suivante, les centres les moins performants seront fermés et ne pourront participer à l'élaboration de la nouvelle solution. Une discussion plus approfondie sur la performance des règles de retour est fournie dans la section *Résultats*.

4 Implantation

Pour l'implantation de l'algorithme proposé, deux phases sont définies. La première phase de localisation et d'affectation des patients consiste à la résolution de la formulation donnée à la section 3 par les bibliothèques ILOG-CPLEX. La résolution de la seconde phase du processus décisionnel a été faite en utilisant l'algorithme parallèle du Clark & Wright avec perturbations [Bolduc et al., 2008]. Cette approche, utilisée par les auteurs dans la résolution d'un problème de confection de tournées avec une flotte hétérogène de véhicules, consiste à l'application de l'algorithme parallèle de Clark & Wright un certain nombre de fois (10 fois dans notre cas). Les valeurs des économies sont calculées chaque fois en utilisant l'équation : $s_{ij} = c_{i0} + c_{j0} - \lambda c_{ij}$, où la valeur de λ est tirée à partir d'une distribution uniforme entre [0,8 ; 1,2]. Le meilleur résultat obtenu après les 10 exécutions est retenu. Nous avons utilisé cet algorithme car il est très performant pour établir des tournées avec peu de clients (petites tournées) comme c'est le cas dans le cadre d'un système de santé à domicile. En effet, le nombre de sommets dans un circuit est rarement supérieur à huit. De plus, l'algorithme Clark & Wright est extrêmement rapide d'exécution.

5 Résultats

Afin d'évaluer la pertinence et la performance de la méthode proposée, les instances issues des travaux de Prins et al. [Prins

et al., 2004] ont été utilisées. Ces 28 instances regroupent différents scénarios contenant 20, 50, 100 ou 200 clients (patients) ; 5 ou 10 centres ; 70 ou 150 unités de capacités de véhicules et les patients (clients) sont localisés de manière à former 1, 2 ou 3 groupes (leur localisation n'est pas uniforme). Ainsi, l'instance nommée 50.5.1b est caractérisée par un problème avec 50 clients, 5 centres, 1 groupe de patients et une capacité des véhicules de 150 unités.

En utilisant ces instances, nous tentons de montrer l'importance de la boucle de retour et, en particulier, d'évaluer comment le choix d'un critère spécifique pour la boucle de retour détermine la performance de la méthode. Pour ce faire, nous avons proposé deux critères, le premier basé sur l'efficacité (E) et le deuxième sur le coût de distribution (C). Le critère E calcule, à la fin de chaque itération, le rapport (coût / demande satisfaite) de chaque centre et celui ayant la valeur la plus élevée sera forcé à être fermé à la prochaine itération. Le critère C évalue le coût de distribution de chaque centre (coût des tournées partant de ce centre) et forcera celui ayant le coût le plus élevé à être fermé à l'itération suivante. Une fois le centre est fermé, il rentre dans une liste de type tabu qui empêche son ouverture pendant un nombre d'itérations fixes (2 itérations pour les instances de 5 centres potentiels et 4 pour celles de 10 centres potentiels).

Enfin, au-delà de l'importance de la boucle de retour, nous nous sommes aussi intéressés à la contribution de la méthode de construction des tournées. Nous avons alors comparé les résultats obtenus par la méthode et les deux critères de la boucle de retour dans les cas où les routes furent bâties avec l'heuristique de Clark & Wright parallèle et celle avec perturbation. Pour chacune des 28 instances résolues l'algorithme distribué a été exécuté durant 20 itérations. La meilleure solution obtenue est celle retenue et présentée dans cette section.

Le Tableau 1 présente les résultats globaux obtenus. Les deux premières colonnes indiquent le type d'heuristique de routage utilisée (CR = Clark & Wright et CRP = meilleure solution après 10 itérations de Clark & Wright avec perturbation) et la stratégie de la boucle de retour (E = efficacité et C = Coût de distribution), respectivement. Les colonnes sous l'entête **Gap** rapportent, pour chaque version de l'heuristique, l'écart en pourcentage entre les solutions de la méthode présentée et la meilleure solution connue. En particulier, la colonne **Av.** rapporte l'écart moyen, tandis que les colonnes **Min** et **Max** rapportent les écarts minimaux et maximaux sur les 28 instances disponibles [Prins et al., 2004]. Des écarts négatifs indiquent que la méthode ici proposée a trouvé une solution meilleure que la meilleure solution connue à ce jour. Le Tableau 1 rapporte également sous l'entête **Amélioration** l'écart, en pourcentage, entre la solution obtenue à la fin de la première itération et la meilleure solution obtenues par la méthode. En d'autres mots, on rapporte l'amélioration sur la solution initiale obtenue par le processus itératif. Finalement, la dernière colonne du Tableau 1 sous l'entête **T** précise le temps moyen de calcul (en secondes) pour l'exécution des 20 itérations de chaque version de l'algorithme.

Tableau 1. Résultats agrégés

Heuristique		Gap (%)			Amélioration (%)			T (s)
		Av.	Min	Max	Av.	Min	Max	
CR	E	5,88	1,21	12,81	-3,74	0,00	-19,57	12
CR	C	5,09	1,33	10,89	-4,41	0,00	-19,84	11
CRP	E	3,40	-2,67	11,61	-4,27	0,00	-23,20	89
CRP	C	2,72	-2,58	8,40	-5,10	0,00	-23,52	87

En analysant les données présentées dans le Tableau 1 on observe que, en moyenne, utiliser la version avec perturbation de l'heuristique de Clark & Wright permet d'améliorer les résultats quel qu'il soit le critère utilisé dans la boucle de retour. De plus, il semble que, toujours pour la version CRP, utiliser le critère basé sur le coût permet d'obtenir de meilleurs résultats moyens (écart de 2,72% pour C et 3,40% pour E). De plus, le pire résultat obtenu par le critère C présente un écart en pourcentage par rapport à la meilleure solution connue de seulement 8,40% au lieu de 11,61% dans le cas du critère E. Enfin, le fait de retrouver des quantités négatives dans la colonne **Min** nos indique que les deux critères ont été capables de battre, dans au moins dans un cas, les meilleures solutions connues. Nous regarderons cet aspect plus en détail à l'aide des Tableaux 2 et 3 qui seront présentés prochainement.

Afin de bien montrer l'effet positif de la boucle de retour sur la qualité de la méthode de recherche, regardons maintenant les informations sous l'entête **Amélioration**. À nouveau, la colonne **Av.** rapporte l'amélioration moyenne tandis que les colonnes **Min** et **Max** rapportent la plus faible et la plus importante amélioration sur les 28 instances. Comme attendu, dans la pire des cas (colonne **Min**) la méthode ne rapportent que des valeurs nulles (aucune amélioration). L'amélioration moyenne varie entre 3,74% (CR avec E) et 5,10% (CRP avec C), tandis que dans les meilleures des cas la méthode a réussi à améliorer la solution initiale entre 19,57% (CR avec E) et 23,52% (CRP avec C).

Quant au temps de calcul, on peut constater que si même l'utilisation de la version perturbé de Clark & Wright engendre une augmentation du temps, le temps moyen sur les 28 instances reste encore très faible sur les instances testées (89 s pour CRP avec E et 87 pour CRP avec C).

La contribution de la boucle de retour nous semble donc pleinement justifiée. Cependant, afin de préciser d'avantage son importance, les Tableaux 2 et 3 présentent les résultats individuels pour chacune des 28 instances obtenues par l'heuristique dans sa configuration CRP et avec les critères de retour C et E, respectivement. La colonne **Coût** rapporte la valeur de la meilleure solution obtenue par la méthode. La colonne **T** le temps total d'exécution en secondes. La colonne **Gap** rapporte l'écart en pourcentage entre la solution de la méthode et la meilleure solution connue. La colonne **Amél.** fournit la valeur d'écart en pourcentage entre la meilleure solution obtenue par la méthode et la solution initiale, tandis que la colonne **It.** indique à quelle itération la méthode a obtenu la meilleure solution.

Le Tableau 2 nous permet de voir que la méthode a obtenu une solution meilleure que la meilleure solution connue dans 1 seule occasion, et que cette solution fut obtenue à la sixième itération. Le tableau 2 permet également de confirmer que, lors que l'heuristique réussit à améliorer la solution initiale (celle issue de la première itération), c'est grâce à l'exécution de plusieurs itérations, ce qui a permis à la recherche de modifier suffisamment la structure de la solution initiale quant au choix des centres.

Le Tableau 3 quant à lui, nous indique que lorsque le critère E est utilisé, la méthode a été capable de fournir 4 nouvelles meilleures solutions, et cela malgré le fait que, en moyenne, le critère E semble moins performant que le critère C. Le Tableau 3 confirme que, à nouveau, plusieurs itérations sont nécessaires pour améliorer la solution initiale et confirment l'utilité du processus itératif.

Tableau 2. Résultats pour la configuration CRP-C

Instance	Coût	T	Gap	Amél.	It.
20-5-1	56452	15	3,03%	-9,16%	17
20-5-1b	41579	19	6,33%	0,00%	1
20-5-2	50575	19	3,41%	0,00%	1
20-5-2b	39068	21	4,06%	0,00%	1
50-5-1	93152	31	3,38%	-23,52%	20
50-5-1b	61610	46	-2,58%	-13,70%	6
50-5-2	92239	28	4,46%	0,00%	1
50-5-2b	72999	43	8,40%	-0,15%	4
50-5-3	91288	29	5,90%	-16,19%	18
50-5-3b	64934	45	5,02%	-8,78%	15
100-5-1	280430	57	1,61%	0,00%	1
100-5-1b	216570	93	1,02%	0,00%	1
100-5-2	197635	71	1,56%	-19,64%	8
100-5-2b	158196	120	0,65%	-11,45%	15
100-5-3	205823	72	2,79%	-8,41%	13
100-5-3b	157498	123	3,22%	-2,84%	16
100-10-1	294286	80	1,33%	0,00%	1
100-10-1b	237181	126	1,08%	0,00%	1
100-10-2	249544	61	2,16%	-4,62%	2
100-10-2b	216052	87	5,91%	0,00%	17
100-10-3	256273	53	1,16%	0,00%	1
100-10-3b	209818	88	2,55%	0,00%	1
200-10-1	487863	187	1,76%	-10,80%	8
200-10-1b	382917	260	1,09%	-4,60%	20
200-10-2	455999	127	1,23%	-6,46%	6
200-10-2b	378067	189	0,97%	-2,97%	16
200-10-3	487589	133	3,11%	-0,17%	2
200-10-3b	369603	219	1,49%	-0,77%	6

Tableau 3. Résultats pour la configuration CRP-E

Instance	Coût	T	Gap	Amél.	It.
20-5-1	62143	16	13,41%	0,00%	1
20-5-1b	41579	18	6,33%	0,00%	1
20-5-2	50759	12	3,79%	0,00%	1
20-5-2b	39068	21	4,06%	-0,58%	7
50-5-1	93546	27	3,81%	-23,20%	2
50-5-1b	61556	53	-2,67%	-13,42%	12
50-5-2	92133	29	4,34%	0,00%	1
50-5-2b	70507	42	4,70%	0,00%	1
50-5-3	94798	28	9,97%	-12,70%	10
50-5-3b	64657	47	4,57%	-9,04%	18
100-5-1	280048	63	1,47%	0,00%	1
100-5-1b	214093	133	-0,14%	-1,30%	9
100-5-2	197575	83	1,53%	-19,92%	4
100-5-2b	158280	121	0,70%	-11,30%	10
100-5-3	223498	75	11,61%	-0,63%	15
100-5-3b	160971	122	5,50%	-0,13%	5
100-10-1	292541	73	0,73%	-0,59%	9
100-10-1b	231428	119	-1,37%	-0,35%	11
100-10-2	261586	80	7,09%	0,00%	1
100-10-2b	213343	122	4,59%	0,00%	1
100-10-3	254011	54	0,26%	-0,54%	19
100-10-3b	204391	86	-0,10%	-1,31%	19
200-10-1	488188	144	1,83%	-10,51%	8
200-10-1b	387763	226	2,37%	-3,39%	12
200-10-2	455457	135	1,11%	-6,58%	14
200-10-2b	376157	208	0,46%	-4,02%	16
200-10-3	488497	136	3,30%	0,00%	1
200-10-3b	371466	213	2,00%	0,00%	1

6 Conclusion

Cet article propose une nouvelle méthode de résolution du problème combiné de localisation / tournées de véhicules (LRP) qui s'appuie sur une approche de décisions distribuées. Cette méthode utilise une estimation de l'impact des tournées lors de la définition de la localisation des centres de service ou dépôts et les informations de localisation sont utilisées pour définir les différentes tournées. Ainsi, nous avons choisi d'implanter une estimation pour anticiper l'effet d'une localisation donnée sur la qualité des tournées possibles (la somme des distances entre le centre et ses clients). De plus, nous avons évalué la performance de deux critères différents pour la boucle de retour, celle qui permet d'affecter le choix des centres entre deux itérations. Le premier critère est basé sur le concept d'efficacité de chaque centre, et le deuxième est basé sur le coût de distribution associé à chaque centre. C'est ainsi que, même en utilisant un algorithme de construction de tournées des plus simples (l'algorithme parallèle de Clark & Wright avec perturbations) la méthode réussit à fournir jusqu'à 4 nouvelles meilleures solutions sur un ensemble de 28 instances de test. Ces résultats sont très encourageants et nous permettent de postuler que les méthodes distribuées offrent un grand potentiel pour les problèmes à deux ou plusieurs niveaux décisionnels. Ce modèle est utilisé actuellement comme outil de design dans le problème de planification des réseaux des Hôpitaux à Domicile en cours actuellement en France. En ce qui concerne les perspectives de ce travail, la considération de plusieurs périodes de distribution au moment de choisir la localisation de centres médicaux est toujours envisageable. De plus, une extension de la méthode de résolution distribuée pour le problème de LRP dans un contexte de gestion de crises est en train de se développer.

7 Références

- Bolduc, M.C., Renaud, J., Boctor, F., Laporte, G., (2008) A perturbation metaheuristic for the vehicle routing problem with private fleet and common carriers, *Journal of the Operational Research Society*, 59, pp. 776-787.
- Gendreau, M., Laporte, G., Séguin, R., (1996) Stochastic Vehicle Routing, *European Journal of Operational Research*, 88, pp. 3-12.
- Germain, N., Monteiro, T., Emmanuel, E. & Rezg, N. (2008), Problématiques de mise en œuvre d'une Hospitalisation Hors les Murs dans un pays en voie de développement : le cas Haïti, in: GISEH08 Gestion et Ingénierie de Systèmes Hospitaliers, Lausanne, Suisse, septembre 2008, Publication EPFL-Lausanne, pp. 669-676, ISBN 978-2-8399-0316-5
- Harper, P. R., Shahania, A. K., Gallagher, J. E., Bowie, C., (2005) Planning health services with explicit geographical considerations: a stochastic location-allocation approach, *Omega*, 33, pp. 141-152.
- Melechivský, J., Prins, C., Wolfler Calvo, R., (2005) A metaheuristic to solve a location-routing problem with linear cost, *Journal of Heuristics*, 11, pp. 375-391.
- Murawski, L., Church, R. L., (2009) Improving accessibility to rural health services: The maximal covering network improvement problem, *Socio-Economic Planning Sciences*, 43, pp. 102-110.
- Nagy, G., Salhi, S., (1996) Nested heuristic methods for the location-routing problem, *Journal of the Operational Research Society*, 47, pp. 1166-1174.
- Nagy, G., Salhi, S., (2007) Location-Routing: Issues, models and methods." *European Journal of Operational Research*,

177, pp. 649-672.

- Pecora, E., Ruiz, A., Soriano, P., (2008) Restricted Search Space (RSS) Heuristic applied to a location-allocation problem, *CORS Optimization Days 2008, joint conference*, Mai, 2008.
- Prins, C., Prodhon C., Wolfler Calvo, R., In: A. Dolgui and S. Dauzère-Pérès. "Nouveaux Algorithmes pour le problème de localisation et routage sous contraintes de capacité" Ecole de Mines de Nantes: Lavoisier. 2004, MOSIM'04 vol2. Pp. 1115-1122.
- Rahman, S., Smith, D. K., (2000) Use of location-allocation models in health service development planning in developing nations, *European Journal of Operational Research*, 123, pp. 437-452
- Rolland, E., Schilling, D. A., Current, J. R., (1997) An efficient Tabu Search Procedure for the p-median problem, *European Journal of Operational Research*, 96, pp. 329-342.
- Salhi, S., Rand, G. K., (1989) The effect of ignoring routes when locating depots, North-Holland, *European Journal of Operational Research*, 39, pp. 150-156.
- Schneeweiss, C. (2003) "Distributed decision making" Heidelberg: Springer-Verlag Berlin, 2nd Ed.
- Srivastava, R., (1993) Alternate solution procedures for the location-routing problem, *International Journal of Management Science*, 21, pp. 497-506.
- Teixeira, J. C., Antunes, A. P., (2008) A Hierarchical location model for the public facility planning, *European Journal of Operational Research*, 185, pp. 92-104.