

# Approches de résolution à deux étapes pour le problème de tournées de véhicules en région sinistrée

DJAMEL BERKOUNE, MONIA REKIK, JACQUES RENAUD

Centre Interuniversitaire de Recherche sur les Réseaux d'Entreprise, la Logistique et le Transport (CIRRELT).  
Université Laval, Québec, Canada

[Djamel.Berkoune@cirrelt.ca](mailto:Djamel.Berkoune@cirrelt.ca), [Monia.Rekik@cirrelt.ca](mailto:Monia.Rekik@cirrelt.ca), [jacques.renaud@fsa.ulaval.ca](mailto:jacques.renaud@fsa.ulaval.ca)

---

**Résumé** - Cet article présente deux approches de résolution, une exacte et une heuristique, pour le problème de distribution de l'aide humanitaire en région sinistrée. Les deux approches proposées divisent le processus de résolution en deux étapes : une 1<sup>ère</sup> étape de génération de routes vides (dites semi-réalisables) et une 2<sup>ème</sup> étape de chargement et de sélection des routes. Deux approches d'énumération sont proposées pour la 1<sup>ère</sup> étape. L'étape 2 utilise un modèle linéaire mixte en nombres entiers qui est résolu par la méthode de branch-and-bound de CPLEX. Les résultats préliminaires obtenus montrent que l'approche exacte donne de très bons résultats (en termes de qualité des solutions obtenues et des temps de calcul) pour les problèmes de petite taille. L'approche heuristique est plus prometteuse pour les problèmes de plus grande taille.

**Abstract** – This paper presents an exact and a heuristic solution approaches for humanitarian help distribution in disaster areas. Both approaches use a two-phase solution process. The first phase aims at generating empty-load, also called semi-feasible, routes. The second step completes routes construction, by specifying their loads, and selects the best ones. This second step is modeled as a mixed integer programming model and solved by the branch-and-bound procedure of CPLEX. Our preliminary results show that the exact solution approach works well for relatively small problems in terms of solution quality and computing times. However, the heuristic approach seems more promising for large problems.

**Mots clés** - Logistique humanitaire, Tournées de véhicules, Modélisation, Heuristique.

**Keywords** - Emergency logistics, Vehicle routing, Modeling, Heuristic.

---

## 1 INTRODUCTION

Les situations de crise, qu'elles proviennent d'un désastre naturel (raz-de-marée, tremblement de terre, inondations, verglas) ou d'un sinistre (déversements chimiques, explosion d'une usine), demandent d'importants déploiements logistiques pour venir en aide aux victimes. Plusieurs problèmes doivent alors être résolus à moyen et court termes et ce à plusieurs niveaux de la chaîne logistique [Sheu, 2007]. La gestion des urgences est divisée en quatre phases principales: l'atténuation, la préparation, l'intervention et le rétablissement [Altay & Green, 2006 ; Haddow, Bullock & Coppola, 2008]. L'atténuation et la préparation sont des phases avant-crise. Elles visent à définir les mesures nécessaires pour réduire, atténuer ou prévenir les impacts des sinistres et à développer des plans d'action qui seront mis en place lors de l'occurrence d'un sinistre. Lorsque survient la crise, les phases de réponse et de récupération s'enclenchent. La phase de réponse, ou d'intervention, correspond à la mobilisation et au déploiement des services d'urgence à l'intérieur de la zone sinistrée dans le but de protéger la population et réduire les dommages humains et matériels. La phase de récupération, ou de rétablissement, définit les mesures menant au retour à la normale, c'est-à-dire, à un niveau de vie de même qualité que ce qu'il était avant.

Dans cet article, nous nous concentrons sur l'un des aspects les plus importants de la phase d'intervention: la distribution de

l'aide humanitaire à l'intérieur de la région sinistrée. Les demandeurs d'aide (les clients) sont dans ce cas les individus d'une population, une agrégation d'individus (une rue, un secteur), des organismes (un hôpital ou un centre de soins), ou encore un point de service quelconque (un pont ou une autoroute à rétablir). Le problème de distribution traité vise à acheminer des produits et/ou services de première nécessité aux « clients » dans des délais très courts. Ces produits et services sont supposés disponibles dans des localisations spécialisées déployées par les gestionnaires de crise à l'intérieur de la région sinistrée pour servir de dépôts provisoires, généralement appelés, Centre de Distribution d'Aide Humanitaire (CDAH). Chacun de ces CDAH dispose d'une flotte limitée de véhicules hétérogènes avec des capacités (en volume et en poids), des règles d'utilisation (temps total de travail) et des caractéristiques (temps de chargement et de déchargement) différentes. Étant donné le contexte particulier d'urgence, notre objectif sera de proposer un déploiement satisfaisant la demande des clients, respectant les contraintes d'offre et minimisant le temps de distribution maximal. Ce temps de distribution tiendra compte à la fois des temps de déplacement et des temps de chargement et déchargement des véhicules utilisés. De plus, la flotte disponible aux CDAH sera exploitée au maximum et l'on tolère qu'un client soit visité par plusieurs tournées.

Nous verrons à la section 3 que ce problème se ramène à un problème de tournées de véhicules multi-produits, multi-dépôts avec flotte hétérogène et livraison partagée (*split delivery*) relativement complexe. Nous proposons à la section 4 deux approches, une exacte et une heuristique, pour le résoudre. Ces approches sont basées sur un processus de résolution à deux étapes qui permet de réduire la combinatoire du problème lorsque comparé à des modèles de type partitionnement. Les résultats expérimentaux préliminaires présentés à la section 5 montrent que l'approche de résolution exacte donne de bonnes solutions en des temps relativement courts pour des problèmes de petite taille. Pour les problèmes de taille plus grande, l'heuristique semble être meilleure.

Cet article est organisé comme suit : une revue de littérature est présentée dans la section 2. Dans la section 3 nous définissons le problème et les notations utilisées. La section 4 contient une description de notre approche de résolution à deux étapes. Les résultats des tests préliminaires effectués sont illustrés à la section 5. La section 6 résume les contributions les plus importantes de cet article et présente nos futurs travaux de recherche.

## 2 REVUE DE LITTÉRATURE

Il existe une littérature vaste et très riche sur les problèmes de tournées. Le problème du voyageur de commerce (*Traveling Salesman Problem – TSP*), qui est au centre de presque tous les problèmes de tournées, a reçu une attention considérable. Des centaines d'articles lui ont été consacrés [Laporte 1992a, 2010] ainsi que de nombreux livres [Lawler et al. 1985, Applegate et al. 2006; Gutin et Punnen, 2007]. Sa généralisation, le problème de tournées de véhicules (*Vehicle Routing Problem – VRP*), a également été largement étudié avec plusieurs livres [Toth et Vigo 2002, Golden et Assad, 2008] et articles scientifiques [Laporte, 1992b; Laporte et Osman, 1995 ; Cordeau et al, 2002; Laporte, 2009]. Le VRP a été utilisé comme banc d'essai pour le développement de métaheuristiques, et nous pouvons considérer que les algorithmes utilisés actuellement sont non seulement très sophistiqués, mais procurent également des solutions très proches de l'optimal [Laporte et al. 2000, Potvin, 2009].

Ces dernières années, la recherche a évolué vers des problématiques moins traitées et plus complexes comme les problèmes dynamiques [Wen et al. 2010], les problèmes de livraison avec fenêtres de temps [Cornillier et al. 2009] et la composition de la flotte [Pessoa et al. 2009]. Parmi ces nouveaux problèmes réalistes, les problèmes de tournées en situation d'urgence sont en émergence et conduisent à de nouveaux défis [Sheu, 2007a]. [Altay et Green, 2006] décomposent les activités de gestion des catastrophes en quatre phases : prévention, préparation, intervention et rétablissement. Ils ont montré que la plupart des recherches ont été effectuées dans les phases de prévention et de préparation. Parmi les activités d'intervention (par exemple, activation d'un plan d'urgence, d'évacuation, de sauvetage d'urgence et de soins médicaux, lutte contre l'incendie,...), ils ont jugé que la planification des tournées pour distribuer l'aide a attiré encore que peu d'attention.

[Sheu, 2007b, 2010] s'est inspiré d'un réseau logistique d'urgence composé des fournisseurs, des centres de distribution et des zones sinistrées. Il a développé un système d'aide à la décision qui effectue les opérations suivantes: le regroupement des zones touchées, la détermination des priorités de distribution et la distribution de l'aide. [Yi et Ozdamar, 2007] décrivent un modèle intégré de localisation du soutien logistique et des opérations d'évacuation des blessés vers les

unités d'urgence. Une partie importante de leur modèle traite la répartition du personnel médical entre les unités d'urgence pour secourir les personnes touchées. [Yi et Kumar, 2007] ont utilisé le modèle de [Yi et Ozdamar, 2007] pour effectuer la distribution mais sans tenir compte de la composante localisation.

[Tzeng et al. 2007] ont utilisé un modèle multi-objectifs de distribution d'aide afin de minimiser la somme du coût total et du temps des voyages et de maximiser la satisfaction minimale des points de livraison. Le réseau étudié renferme cinq points de collecte, huit points de demande et quatre dépôts de transfert. [Chern et al. 2009] ont étudié un réseau similaire avec quatre nœuds d'approvisionnement, quatre nœuds de distribution, huit nœuds de demande et également des stations de carburant. Ils considèrent deux types de demandes : entrants (par exemple, nourriture, eau, fournitures médicales) et sortants (par exemple, morts, blessés), ainsi que la date prévue pour chaque type de demande. [Campbell, 2008] a considéré que la fonction de coût peut être pertinente dans les situations d'urgence, et elle a proposé deux fonctions objectif alternatives, une qui minimise l'heure d'arrivée maximale et une qui minimise le temps moyen d'arrivée.

[Balcik et al. 2008] ont étudié la livraison de l'aide à partir de centres de distribution vers des bénéficiaires. Les auteurs minimisent la somme des coûts de transport et des coûts de pénalité pour les demandes non satisfaites. La méthode utilisée est en deux phases. Une phase de génération qui crée une liste des routes candidates et une seconde phase de sélection de routes basée sur un modèle mathématique. Finalement, [Jotshi et al. 2010] ont développé une méthodologie pour l'acheminement des véhicules d'urgence avec l'objectif de créer de meilleures liaisons entre les points où se trouvent les victimes et les hôpitaux.

## 3 DEFINITION DU PROBLEME

En situation d'urgence, l'aide humanitaire correspond à des produits tangibles (repas, produits sanitaires, médicaments, eau, lits, ...) et/ou à des services (sécurisation d'un pont, rétablissement d'une ligne électrique). Ces produits et services sont disponibles dans ce que nous avons appelé CDAH et qui servent de dépôts provisoires. Le contexte étudié suppose que le nombre, l'emplacement et la dotation en produits et services des CDAH ont déjà été fixés au préalable et ne seront pas changés au courant de l'horizon de planification (cet horizon peut s'étendre sur quelques heures ou sur une journée complète). Les demandeurs d'aide (les clients) sont les individus d'une population, une agrégation d'individus (une rue, un secteur), des organismes (un hôpital ou un centre de soins), ou encore un point de service quelconque (un pont ou une autoroute à rétablir). La nature et la quantité de la demande varient d'un 'client' à un autre selon la sévérité des dommages mais sont supposées fixes, pour un client donné, durant l'horizon de planification considéré.

L'aide humanitaire devra être acheminée à partir des différents CDAH aux différents points de demande à l'aide de véhicules (lorsqu'il s'agit de produits) ou de fournisseurs de services (lorsqu'il s'agit de services). Compte tenu de la diversité des besoins à combler en situation de crise, la flotte de véhicules disponibles peut être très fortement hétérogène (véhicules légers, remorques, semi-remorques, citernes). De plus, considérant les équipements spécifiques des véhicules (grues, ouvertures des portes, système de réfrigération), ceux-ci peuvent être restreints à ne livrer qu'un éventail limité de produits.

En situation de crise, l'emphase est généralement mise sur la vitesse à laquelle l'aide est distribuée aux sinistrés ; ce qui peut se traduire par un objectif qui consiste à minimiser la durée des opérations de distribution. Étant donnée la forte hétérogénéité de la flotte de véhicules utilisée, un élément important à considérer lors des calculs des temps de distribution concerne les opérations de manutention pour le chargement des véhicules aux CDAH et leur déchargement aux divers points de livraison. Ces temps dépendent de la nature du produit, du type de véhicule et possiblement des infrastructures disponibles aux CDAH et aux points de livraison. Ceci constitue un élément de différenciation important par rapport aux problèmes de tournées de véhicules classiques où l'on suppose généralement que les camions sont pleins et prêts à partir le matin.

Comme tout problème de tournées de véhicules, certaines restrictions par rapport à la capacité des véhicules (en termes de volume et de poids) et à la durée des tournées doivent être prises en considération lors de la planification des opérations de transport [Toth et Vigo, 2002]. On suppose également qu'un véhicule devra revenir à son CDAH d'origine après sa tournée.

Le Problème de Tournées de Véhicules en Région Sinistrée (VRP – RS) est donc défini sur un graphe où les nœuds d'offre sont les CDAH, les nœuds de demande sont les points de la région sinistrée où l'aide devra être acheminée. L'ensemble des arcs du graphe est défini par rapport au réseau routier reliant les différents nœuds du réseau. À chacun de ces arcs est associée une durée de déplacement qui tient compte de l'état des routes suite au sinistre. L'objectif du VRP-RS est de satisfaire la demande des différents points de livraison pour les différents produits et services à partir des différents CDAH, en tenant compte de la disponibilité des véhicules, de leurs types, de leurs capacités en poids et volume, de la durée maximale d'opération ainsi que de la disponibilité des produits et services à chaque CDAH. Contrairement aux problèmes de tournées de véhicules classiques où l'objectif consiste généralement à minimiser la durée totale de déplacement et à utiliser le moins de véhicules possibles, nous considérons ici un objectif propre aux situations d'urgence et qui vise à acheminer l'aide à tous les points de demande en les temps les plus courts possibles. De ce fait, le VRP-RS aura pour objectif de minimiser la durée de distribution maximale ; cette durée devant tenir compte des temps de déplacement et des temps de chargement et déchargement des véhicules. En effet, en situation de crise, on souhaite que l'aide parvienne aux sinistrés dans des temps relativement courts surtout dans les premières heures suivant le sinistre (à ce moment, on ignore l'ampleur des dégâts et la vie des gens pourrait être en péril). Un temps d'accès maximum est généralement pré-spécifié pour garantir que chaque point de demande soit livré à l'intérieur de ce temps d'accès maximum. Plus encore, étant donné le contexte particulier d'urgence, la flotte disponible aux CDAH sera exploitée au maximum et on l'on tolère qu'un client soit visité par plusieurs tournées. On est donc en présence d'un problème de tournées de véhicules multi-produits, multi-dépôts avec flotte hétérogène et livraison partagée (*split delivery*).

La figure 1 illustre un exemple du problème VRP-RS étudié. Dans cet exemple, 11 points de demande (représentés par des cercles) doivent être livrés à partir de 3 CDAH (représentés par des carrés) via les véhicules de différents types disponibles à chaque CDAH. On suppose que le réseau routier définit un graphe complet impliquant ainsi que tous les nœuds (points de demande et CDAH) sont reliés entre eux par

des arcs (non représentés sur le graphe pour alléger sa représentation). Les cercles en pointillés entourant chaque CDAH représentent le temps d'accès maximum préfixé par les gestionnaires de crises. Par exemple, seuls les points de demande 3, 4, 6 et 7 sont accessibles à partir du CDAH 2 en un temps inférieur ou égal au temps d'accès maximum par un aller-simple partant de ce CDAH et allant directement à ces points. De ce fait, le point 6, par exemple, ne sera livré qu'à partir du CDAH 2. Le point 3 étant à l'intérieur des rayons de couverture des CDAH 2 et 3 pourra être livré à partir de ces 2 CDAH. Étant donné que la livraison partagée est tolérée, la demande du point 3 pour un produit donné pourra être satisfaite par deux voyages différents utilisant possiblement des véhicules différents et partant possiblement de CDAH différents (CDAH 2 et/ou 3).

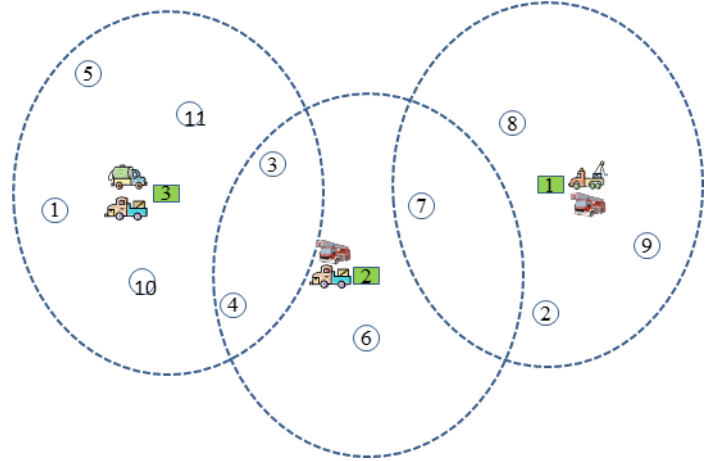


Figure 1. Un exemple du VRP-RS

#### 4 APPROCHES DE RESOLUTION

L'objectif du VRP-RS est de produire des tournées réalisables à partir des CDAH vers les différents points de livraison afin de satisfaire leurs demande en produits et services en le moins de temps possible. Une tournée est réalisable si elle respecte les contraintes de capacité et de durée relatives au véhicule auquel elle est affectée. Ces contraintes dépendent du type du véhicule utilisé, de la nature et de la quantité du produit livré par cette tournée (temps de chargement et déchargement), et des emplacements du point origine (le CDAH) et des points de livraison (les clients) constituant la tournée. Bien évidemment, énumérer toutes les routes réalisables (avec leurs chargements) exigerait beaucoup de temps et résulterait en un nombre exorbitant de tournées qui ne pourraient être gérées par des modèles de type partitionnement. Ce nombre est d'autant plus grand dans le contexte de livraison partagée (*split delivery*) traité ici.

De ce fait, l'approche de résolution que nous proposons est basée sur deux étapes : une première étape pour la génération de tournées dites *semi-réalisables*, ou vides, suivie d'une deuxième étape de chargement et de sélection des meilleures tournées réalisables. Deux approches seront proposées pour la 1<sup>ère</sup> étape: la première consiste en une énumération complète de toutes les routes vides prometteuses ; la deuxième utilise une heuristique pour restreindre "convenablement" l'ensemble des routes semi-réalisables générées. La 2<sup>ème</sup> étape utilise un modèle linéaire mixte en nombres entiers pour décider simultanément des routes à retenir et de leurs chargements.

### 3.1. Notation et terminologie :

$I$  : ensemble des points de livraison (clients).  
 $J$  : ensemble des produits à livrer.  
 $L$  : ensemble des CDAH.  
 $K$  : ensemble des véhicules.  
 $d_{ij}$  : la demande du client  $i$  pour le produit  $j$ .  
 $p_{jl}$  : la quantité du produit  $j$  disponible au CDAH  $l$ .  
 $K_l$  : ensemble des véhicules disponibles au CDAH  $l$ .  
 $J_k$  : ensemble des produits pouvant être servis par un véhicule  $k$ .  
 $D_k$  : le temps d'opération maximum toléré pour un véhicule  $k$ .  
 $V_k$  : la capacité maximale en volume du véhicule  $k$ .  
 $W_k$  : la capacité maximale en poids du véhicule  $k$ .  
 $v_j$  : le volume occupé par une unité du produit  $j$ .  
 $w_j$  : le poids relatif à une unité du produit  $j$ .  
 $t_{li}$  : la durée de déplacement entre deux points  $l$  et  $i$ .  
 $\tau$  : temps d'accès maximum.

On suppose dans la suite que les camions présents à un CDAH sont tous de type différent. Notons que l'on pourra toujours se ramener à un tel contexte en dupliquant le nombre de types de véhicules dans le cas où deux véhicules d'un même type sont disponibles à un CDAH. De plus, un véhicule  $k$  se trouvant au départ à un CDAH  $l$  doit toujours revenir à son point d'origine  $l$ . Le VRP-RS est défini sur le graphe  $(L \cup I, A)$ , où  $A$  désigne l'ensemble des arcs disponibles sur le réseau routier reliant les différents sommets. À chaque arc  $(l, i) \in A$  est associée une durée de déplacement  $t_{li}$ . Rappelons que cette durée tient compte de l'état des routes suite au sinistre. On suppose qu'elle reste fixe tout au long de l'horizon de planification.

### 3.2 Étape 1 : Génération des tournées semi-réalisables

Une tournée  $r = (l, k, S)$ , dite semi-réalisable, est définie par : (1) son CDAH d'origine  $l$ , (2) le véhicule  $k$  (parmi ceux disponibles au CDAH) auquel elle est affectée, (3) la séquence des points de livraison  $S$  qu'elle visite. Les tournées générées à cette première étape sont des tournées « vides » et tiendront compte uniquement des temps de déplacement (sans chargement et déchargement). Ces temps seront pris en considération pour générer des tournées avec des durées totales qui respectent les contraintes sur les durées maximales (i.e., les  $D_k$ ). Afin de tenir compte de la contrainte sur le temps d'accès maximum ( $\tau$ ), nous limitons les points de livraison d'une tournée à ceux pouvant être visités en un temps inférieur ou égale au temps d'accès maximum  $\tau$  pré-spécifié.

Deux approches sont proposées pour l'énumération des tournées semi-réalisables : une première approche dite d'énumération complète et une 2<sup>ème</sup> approche dite d'énumération partielle.

#### 3.2.1 Énumération complète

Cette approche énumère toutes les tournées semi-réalisables prometteuses qui respectent la contrainte du temps d'accès maximum. La notation suivante sera utilisée pour décrire l'algorithme proposé :

$I_l$  : Ensemble des points de demande pouvant être atteints à partir du CDAH  $l$  en un temps inférieur ou égal au temps d'accès maximum  $\tau$  avec un voyage direct ( $I_l = \{i \in I : t_{li} \leq \tau\}$ ).

$I_l^u$  : un sous-ensemble non vide de  $I_l$ .

$S_l^u$  : la séquence optimale de visite des points dans  $I_l^u$  (départ du dépôt et retour au dépôt) qui minimise le temps d'accès

maximal au dernier point visité dans  $I_l^u$  (en tenant compte uniquement des temps de déplacement).

L'algorithme d'énumération complète est décrit comme suit :

Pour chaque CDAH  $l \in L$  :

1. Déterminer l'ensemble  $I_l$
2. Déterminer tous les sous-ensembles  $I_l^u$  ( $u = 1, \dots, 2^{|I_l|} - 1$ )
3. Pour chaque sous-ensemble  $I_l^u$ , déterminer la séquence optimale  $S_l^u$  correspondante. Ce problème se ramène à la résolution d'un TSP restreint à l'ensemble  $I_l^u$ .  
Si la séquence  $S_l^u$  respecte la contrainte sur le temps d'accès maximum, retenir cette séquence ; sinon la rejeter.
4. Pour chaque véhicule  $k$  se trouvant au CDAH  $l$  ( $k \in K_l$ ), et pour chaque séquence  $S_l^u$  retenue à l'étape 3, générer la tournée  $(l, k, S_l^u)$  si la séquence  $S_l^u$  respecte la durée maximale de tournée tolérée pour le véhicule  $k$ .

#### Algorithme d'énumération complète

Dépendamment de la taille des sous-ensembles  $I_l^u$  générés à l'étape 2 de l'algorithme d'énumération, le TSP (étape 3 de l'algorithme) peut être plus ou moins facile à résoudre à l'optimalité. Dans le cas où le TSP obtenu est de grande taille, on peut le résoudre par une heuristique de type *Farthest Insertion*. Notons cependant qu'en situation d'urgence, étant donné les restrictions imposées par le temps d'accès maximum et l'objectif de réduire au maximum les temps d'accès aux clients, on s'attend à avoir des problèmes de TSP de tailles relativement petites.

#### 3.2.1 Énumération partielle :

Cette approche diffère de l'approche d'énumération complète au niveau de l'énumération des sous-ensembles  $I_l^u$  (à l'étape 2). En effet, dans les cas où la taille de l'ensemble  $I_l$  est relativement grande, énumérer tous les sous-ensembles non vides de  $I_l$  serait intraitable en pratique (il y en a :  $2^{|I_l|} - 1$ ). Nous proposons dans ce qui suit une heuristique, dite d'énumération partielle, basée sur la méthode de balayage qui permet de restreindre le nombre de sous-ensembles ( $I_l^u$ ) à considérer.

Pour chaque CDAH  $l \in L$  :

1. Déterminer l'ensemble  $I_l$
2. Ordonner les éléments de  $I_l$  dans un ordre croissant par rapport à leurs coordonnées polaires. Soit  $I_l^{ord}$  cet ensemble ordonné.
3. Définir tous les sous-ensembles non vides  $I_l^{u,ord}$  ( $u = 1, \dots, |I_l|!$ ) de  $I_l^{ord}$  incluant  $m$  ( $m=1, \dots, |I_l|$ ) éléments consécutifs de  $I_l^{ord}$ .
4. Pour chaque sous-ensemble  $I_l^{u,ord}$ , déterminer la séquence optimale de visite des clients (départ du dépôt et retour au dépôt) qui permet de minimiser le temps d'accès maximal au dernier point visité parmi ces clients (en tenant compte uniquement des temps de déplacement). Comme à l'étape 3 de

l'algorithme d'énumération complète, ce problème se ramène à la résolution d'un TSP restreint à l'ensemble  $I_l^{u,ord}$ . Soit  $S_l^u$  la séquence optimale ainsi obtenue. Si la séquence  $S_l^u$  respecte la contrainte sur le temps d'accès maximum, retenir cette séquence ; sinon la rejeter.

5. Pour chaque véhicule  $k$  se trouvant au CDAH  $l$  ( $k \in K$ ), et pour chaque séquence  $S_l^u$  retenue à l'étape 4, générer la tournée  $(l, k, S_l^u)$  si la séquence  $S_l^u$  respecte la durée maximale de tournée tolérée pour le véhicule  $k$ .

### Algorithme d'énumération partielle.

Il convient de noter, qu'en situation d'urgence, on peut chercher à limiter le nombre de clients visités par une tournée donnée. Cette contrainte permet de réduire considérablement la taille des ensembles  $I_l^u$ .

### 3.3 Étape 2 : Chargement et sélection des tournées

Rappelons que l'objectif de cette deuxième étape est de proposer un chargement des tournées vides générées à la 1<sup>ère</sup> étape et de retenir les meilleures tournées "chargées" afin de minimiser le temps de distribution maximal. Ceci se fera via un MIP qui est décrit en utilisant la notation suivante :

#### Ensembles et paramètres :

$R$  : ensemble des tournées semi-réalisables générées à la première étape (soit par l'approche d'énumération complète, soit par l'approche d'énumération partielle).

$r = (l, k, S)$  : Une tournée dans  $R$  partant du CDAH  $l$ , utilisant le véhicule  $k$  et visitant les clients selon l'ordre défini dans  $S$ .

$\delta_{rl} = 1$ , si la tournée  $r$  part du CDAH  $l$  ; 0 sinon.

$\alpha_{rk} = 1$ , si la tournée  $r$  utilise le véhicule  $k$  ; 0 sinon.

$\beta_{ri} = 1$ , si la route  $r$  visite le point de livraison  $i$  ; 0 sinon.

$\rho_{rji}$  : le temps de chargement au CDAH  $l$  et de déchargement au point de livraison  $i \in S$  d'une unité du produit  $j$  dans le véhicule  $k$  à la route  $r = (l, k, S)$ .

$T_r^d$  = le temps de déplacement (sans les temps de chargement et de déchargement) correspondant à la tournée  $r$ .

$\tilde{T}_r^d$  = le temps de déplacement nécessaire pour la tournée  $r$  (sans les temps de chargement et de déchargement) pour accéder au dernier client de la tournée (ce temps est différent de  $T_r^d$  dans la mesure où il ne tient pas compte du temps de retour au dépôt).

#### Variables de décision :

$$x_r = \begin{cases} 1, & \text{si la route } r \text{ est retenue,} \\ 0, & \text{sinon.} \end{cases} \quad \forall r \in R$$

$y_{rji}$  = la quantité du produit  $j$  livrée par la tournée  $r$  au client  $i$ ,  $\forall r = (l, k, S) \in R, \forall j \in J_k, \forall i \in S$ .

$L_{Max}$  = le temps de distribution maximal.

Notons que si une tournée  $r = (l, k, S) \in R$  est choisie (i.e.,  $x_r = 1$ ), alors le chargement du véhicule  $k$  correspondant est donné par :  $Q_r = \sum_{j \in J} \sum_{i \in S} y_{rji}$  et la durée de la tournée est :  $D_r = \sum_{j \in J} \sum_{i \in S} \rho_{rji} y_{rji} + T_r^d$ ;

#### Modèle mathématique :

$$(P) : \quad \text{Min } L_{Max} \quad (1)$$

s.t.

$$\sum_{r \in R} \beta_{ri} y_{rji} = d_{ij} \quad \forall i \in I, j \in J \quad (2)$$

$$\sum_{r \in R} \sum_{i \in I} \delta_{rl} \beta_{ri} y_{rji} \leq p_{jl} \quad \forall l \in L, j \in J \quad (3)$$

$$\sum_{r \in R} \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \alpha_{rk} \beta_{ri} w_j y_{rji} \leq W_k \quad \forall k \in K \quad (4)$$

$$\sum_{r \in R} \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \alpha_{rk} \beta_{ri} v_j y_{rji} \leq V_k \quad \forall k \in K \quad (5)$$

$$\sum_{j \in J} \sum_{i \in I} \beta_{ri} \rho_{rji} y_{rji} + T_r^d x_r \leq \sum_{k \in K} \alpha_{rk} D_k x_r \quad \forall r \in R \quad (6)$$

$$\sum_{j \in J} \sum_{i \in I} \beta_{ri} \rho_{rji} y_{rji} + \tilde{T}_r^d x_r \leq L_{Max} \quad \forall r \in R \quad (7)$$

$$\sum_{r \in R} \alpha_{rk} x_r \leq 1 \quad \forall k \in K \quad (8)$$

$$L_{Max} \geq 0; x_r = 0, 1; \forall r \in R; y_{rji} \geq 0; \forall r \in R, j \in J, i \in I \quad (9)$$

La fonction objectif (1) minimise le temps de distribution maximal. Les contraintes (2) exigent que la demande de chaque client pour chaque produit soit satisfaite avec les tournées sélectionnées. Les contraintes (3) garantissent que la quantité totale d'un produit  $j$  livrée à partir d'un CDAH  $l$  via les tournées partant de  $l$  soit inférieure ou égale à la quantité disponible de ce produit au CDAH  $l$ . Les contraintes (4), respectivement (5), assurent que le poids, respectivement, le volume, total des produits chargés dans une tournée effectuée par un véhicule  $k$  soit inférieure à la capacité maximale du véhicule en terme de poids, respectivement, volume. Les contraintes (6) garantissent que la durée totale d'une tournée  $r = (l, k, S)$  soit inférieure ou égale à la durée maximale d'opération permise pour le véhicule  $k$  correspondant. Les contraintes (6) permettent également de lier les variables de chargement  $y_{rji}$  aux variables de tournées  $x_r$ . Ainsi, si la tournée  $r$  n'est pas sélectionnée ( $x_r = 0$ ), toutes les variables de chargement correspondantes sont nulles par ces contraintes. Les contraintes (7) fixent la borne supérieure du temps de distribution (accès maximum) pour tous les clients à  $L_{Max}$ . Les contraintes (8) assurent qu'un véhicule  $k$  soit utilisé par une et une seule tournée. Les contraintes (9) définissent la nature des variables de décision du modèle.

Tel que présenté, le modèle (P) tolère qu'un point de demande soit livré par plusieurs routes distinctes (*split delivery*). Cependant, en situation d'urgence, on peut vouloir limiter le nombre de fois qu'un point de demande est livré. Ceci est fait dans le but, par exemple, d'alléger les opérations de gestion des opérations de collecte et de livraison ou de réduire le nombre d'accès à certaines zones très touchées ou à risque. Si une telle restriction est considérée, il suffit de rajouter au modèle (P) l'ensemble de contraintes suivant :

$$\sum_{r \in R} \beta_{ri} x_r \leq N_i^a \quad \forall i \in I; \quad (10)$$

où  $N_i^a$  représente le nombre maximum de visites permises pour un point de livraison  $i$ .

Il convient de noter que lorsque combiné avec la méthode d'énumération complète où le TSP est résolu à l'optimalité, le modèle de l'étape 2 constitue une méthode de résolution exacte du VRP-RS. Considérer un ensemble restreint de tournées semi-réalisables tel que fourni par l'approche d'énumération partielle pour résoudre le problème de la 2<sup>ème</sup> étape fournit une méthode de résolution heuristique. Dans ce qui suit, nous référons à ces deux approches par : approche exacte et approche heuristique.

## 5 EXPERIMENTATION

Cette section présente quelques résultats expérimentaux préliminaires obtenus suite à l'application des approches de résolution exacte et heuristique décrites plus haut. Les méthodes d'énumération des routes semi-réalisables ainsi que les modèles mathématiques de l'étape 2 ont été codés en Visual Basic et la procédure de Branch-and-Bound de CPLEX 12.0 (avec ses paramètres par défaut) a été utilisée pour résoudre tous les problèmes tests générés sur un PC Intel Core 2 Duo, 3.00 GHz et 4.00 Go RAM. Un temps limite d'une heure a été fixé pour la résolution des MIP avec CPLEX.

### 5.1 Problèmes tests :

Trois ensembles d'instances ont été générés aléatoirement et dans lesquels on a fait varier le nombre de CDAH ( $|L|=3$  ou  $4$ ) et le nombre de véhicules disponibles par CDAH ( $|K^l|=3$  ou  $4$ ) (Notons que ces instances supposent que le nombre de véhicules disponibles à chaque CDAH est le même pour tous les CDAH pour un ensemble d'instances donné). Tous les problèmes générés considèrent 15 points de livraison ( $|I|=15$ ) et 2 types de produit ( $|J|=2$ ). Lors de la génération de ces instances, on a fait l'hypothèse que les temps de chargement et de déchargement d'une unité de produit dépendaient uniquement du type de véhicule et du type de produit. Dans la suite, un ensemble d'instances sera représenté par la paire  $(|L|, |K^l|)$ .

L'approche de résolution proposée sera testée dans les cas où :

- le nombre de clients visités par une tournée est limité à 3 ou 4; et
- le nombre de livraisons faites pour client est limité à 1, 2, 3 ou 4 visites maximum.

Huit instances sont ainsi obtenues pour chaque ensemble  $(|L|, |K^l|)$  pour un total de 24 instances.

Il convient de noter qu'étant donné que pour les instances considérées, le nombre de visites maximum tolérés par une tournée ne dépasse pas 4, les problèmes de TSP (de l'étape de génération) ont été résolus à l'optimalité par une simple énumération de toutes les séquences possibles.

### 5.2 Résultats expérimentaux :

Le tableau 1 suivant donne les résultats obtenus pour chaque ensemble d'instances  $(|L|, |K^l|)$  et pour chaque approche de résolution (exacte et heuristique). Dans ce tableau, la colonne "Max Visite" indique le nombre maximum de points de demande qu'une tournée peut visiter pour l'instance considérée. La colonne "Split" donne le nombre de visites maximum toléré pour un point de livraison. Pour chaque approche de résolution, nous avons rapporté le nombre total de routes semi-réalisables générées à la première phase (sous la colonne "Nb\_Rte"), la meilleure solution obtenue pour le MIP de la 2<sup>ème</sup> phase à l'intérieur du temps limite d'une heure (colonne "Sol") ainsi que le gap d'intégrité correspondant tel que fourni par CPLEX au bout d'une heure (la colonne "Gap").

Afin d'évaluer la qualité des solutions obtenues par l'approche heuristique, nous avons également rapporté l'écart en pourcentage (colonne Écart) entre la meilleure solution obtenue par l'approche heuristique et celle obtenue par la méthode exacte.

Inst.	$( L ,  K^l )$	Max Visite	Split	Méthode Exacte			Heuristique			Écart
				Nb_Rte	Sol	Gap	Nb_Rte	Sol	Gap	
1	(3, 4)	3	1	5496	72,67	0,00%	820	72,67	0,00%	0,00%
2			2		67,87	0,00%		67,87	0,00%	0,00%
3			3		66,27	0,00%		68,41	2,88%	3,23%
4			4		66,27	2,43%		68,41	3,04%	3,23%
5		4	1	11512	72,67	0,00%	1692	72,67	0,00%	0,00%
6			2		67,87	0,00%		68,70	8,19%	1,22%
7			3		66,27	7,83%		68,41	12,33%	3,23%
8			4		66,27	2,43%		68,41	10,41%	3,23%
9	(3, 3)	3	1	2190	65,33	0,00%	894	72,94	0,00%	11,65%
10			2		64,86	5,10%		68,74	0,00%	5,97%
11			3		64,86	8,07%		68,74	0,00%	5,97%
12			4		64,86	9,28%		68,74	0,00%	5,97%
13		4	1	3339	65,33	0,00%	1935	72,94	0,00%	11,65%
14			2		64,86	7,16%		69,50	22,83%	7,15%
15			3		64,86	10,98%		68,74	22,96%	5,97%
16			4		65,03	11,73%		68,74	21,69%	5,70%
17	(4, 4)	3	1	4432	61,34	0,00%	1464	61,34	0,00%	0,00%
18			2		56,54	0,00%		56,54	0,00%	0,00%
19			3		54,94	0,00%		55,41	0,00%	0,85%
20			4		54,94	0,00%		55,41	0,00%	0,85%
21		4	1	7832	61,34	0,00%	2936	61,34	0,00%	0,00%
22			2		56,54	0,00%		56,54	0,00%	0,00%
23			3		54,94	0,00%		55,41	0,00%	0,85%
24			4		54,94	1,46%		55,41	0,00%	0,85%

Tableau 1 : Solutions obtenues par les deux approches

Les résultats du tableau 1 montrent que les deux approches identifient une solution optimale pour toutes les instances où le nombre de livraisons maximum toléré pour un client est égal 1. Il convient de noter que ce type d'instances correspond en fait aux cas où aucun *split* n'est permis.

Le tableau 1 montre également que l'approche exacte résout le problème à l'optimalité pour 14 instances sur les 24 considérées (à l'intérieur du temps limite d'une heure). Pour les 10 autres instances, le gap tel que fourni par CPLEX (qui est calculé par rapport à la meilleure borne inférieure) varie entre 1,46 % (pour l'instance 24) et 11,73% (pour l'instance 16) et est en moyenne égal à 6,6%.

L'approche heuristique produit des solutions de moindre qualité que la méthode exacte pour 17 instances sur 24. L'écart entre les solutions obtenues par l'heuristique et celles obtenues par la méthode exacte pour ces 17 instances est en moyenne égal à 3,23%. Cet écart reste inférieur à 3,23% pour 9 instances (sur les 17) et atteint 11,65% (instances 9 et 13). Il ressort également du tableau 1 que les MIP avec ensembles restreints (méthode heuristique) de la deuxième phase sont parfois très faciles et parfois très difficiles à résoudre à l'optimalité (cette information est donnée par la colonne "Gap" de l'approche heuristique). En effet, ces modèles ont été résolus à l'optimalité (gap nul) pour 16 instances sur les 24 testées. Le gap moyen pour les 8 instances non résolues à l'optimalité est de 13,04% avec des valeurs dépassant 21 % pour les instances 14, 15 et 16. Ces mêmes instances ont été également les plus difficiles à résoudre avec l'approche exacte. Elles correspondent en fait à l'ensemble  $(|L|, |K^l|)$  le plus contraint parmi les trois considérés (3 CDAH et 3 véhicules par CDAH).

Il convient de noter ici que même si l'approche heuristique résulte en des MIP facilement solvables à l'optimalité à la deuxième phase, l'écart par rapport à la solution optimale du VRP-RS peut être relativement grand. Ceci est dû au fait que cette approche ne considère pas l'ensemble de toutes les routes semi-réalisables comme c'est le cas pour l'approche exacte. À

titre d'exemple, les MIP de l'étape 2 de l'instance 9 ont été résolus à l'optimalité pour les deux approches. Cependant, l'écart entre les deux solutions est de 11,65% ce qui implique que la solution produite par l'heuristique dans ce cas s'éloigne de 11,65% de l'optimum du VRP-RS. En fait, sur les 14 instances du VRP-RS résolues à l'optimalité (i.e., celles pour lesquelles le modèle de la 2<sup>ème</sup> étape de la méthode exacte a été résolu à l'optimalité), la meilleure solution fournie par l'heuristique (en une heure) s'écarte en moyenne de 2,17% de l'optimum. Pour les 10 instances restantes, l'écart maximum par rapport à l'optimum est en moyenne égal à 11,38%. Ainsi, pour l'instance 24, par exemple, qui n'a été résolue à l'optimalité par aucune des deux méthodes, le gap correspondant à l'approche exacte tel que fourni par CPLEX est de 1,46%. L'écart entre la meilleure solution fournie par l'heuristique et la meilleure solution fournie par la méthode exacte est de 0,85%. Donc, pour cette instance, la méthode heuristique fournit une solution qui s'éloigne de l'optimum de 2,31% au maximum.

Les résultats du tableau 1 montrent également que plus le nombre de visites permises pour un client augmente (la valeur dans la colonne "Split" augmente), plus le modèle de l'étape 2 est difficile à résoudre et plus le temps de distribution maximum est réduit (pour les instances résolues à l'optimalité). Ceci est dû au fait que le nombre d'alternatives de livraison augmente au fur et à mesure que le split est accentué ce qui a pour effet d'améliorer la qualité des solutions obtenues mais d'augmenter en même temps la combinatoire du problème.

Le tableau 2 suivant compare les deux approches en termes des temps de calcul requis. Ainsi, nous avons rapporté pour chaque approche : (1) le temps (en secondes) requis pour la 1<sup>ère</sup> phase de génération des routes semi-réalisables (2) le temps requis (en secondes) pour la résolution des MIP de la 2<sup>ème</sup> étape. Pour les MIP non résolus à l'optimalité, nous avons rapporté la valeur 3600 qui correspond au temps limite d'une heure fixé pour CPLEX. (3) le temps total de résolution (sous la colonne "1+2") pour les instances résultant en un modèle de l'étape 2 solvables à l'optimalité en dedans d'une heure.

Les résultats du tableau 2 montrent que les temps de génération de routes semi-réalisables (1<sup>ère</sup> étape) par l'approche heuristique est très petit (inférieur à 0,5 sec.) pour toutes les instances considérées. Ce temps dépasse cependant les 629 secondes pour l'approche exacte (( $|L|, |K^l|$ )=(4,4)) où 7832 routes sont générées (voir tableau 1) comparées à 2936 routes pour l'approche heuristique. Pour l'approche exacte, le temps requis à la 1<sup>ère</sup> phase croit considérablement lorsque le nombre maximum de clients visités par une route passe de 3 à 4. Ainsi, le temps de génération des routes pour les instances correspondant à "Max Visite =3" est de 78,5 secondes en moyenne alors qu'il est de 530,7 secondes en moyenne pour "Max Visite =4".

Pour l'étape 2, tel que déduit du tableau 1, les MIP ont été résolus à l'optimalité pour 14 instances avec la méthode exacte et 17 instances avec la méthode heuristique. Le temps moyen de résolution est de 545,81 secondes pour l'approche exacte (pour les 14 instances) et de 824,87 secondes pour l'approche heuristique (pour les 17 instances). Cet écart est dû aux 3 MIP des 3 instances non résolues à l'optimalité par la méthode exacte et qui l'ont été par la méthode heuristique (instances 10, 11 et 12). En effet, si nous considérons les instances qui ont été résolues à l'optimalité à l'étape 2 par les deux approches (il y en a 13 en tout), le temps de résolution est de 443,27 secondes en moyenne pour l'approche exacte et 568,03 secondes en moyenne pour l'heuristique. Donc, ces temps restent comparables.

Inst.	( L ,  K <sup>l</sup>  )	Max Visite	Split	Méthode Exacte			Heuristique		
				Étape 1	Étape 2	1+2	Étape 1	Étape 2	1+2
1	(3, 4)	3	1	62,85	88,84	151,69	0,24	27,92	<b>28,16</b>
2			814,42		877,27	1491,45		<b>1491,69</b>	
3			128,90		191,75	3598,43		3598,67	
4			3600		-	3600		-	
5		4	1	476,32	587,01	1063,33	0,22	42,37	<b>42,59</b>
6			1878,78		2355,10	3600		-	
7			3600		-	3600		-	
8			3600		-	3600		-	
9	(3, 3)	3	1	66,48	42,91	109,39	0,21	31,25	31,46
10			3600		-	2258,84		2259,05	
11			3600		-	1809,47		1809,68	
12			3600		-	2055,23		2055,44	
13		4	1	486,47	64,29	550,76	0,25	71,86	72,11
14			3600		-	3600		-	
15			3600		-	3600		-	
16			3600		-	3600		-	
17	(4, 4)	3	1	83,22	37,93	121,15	0,43	8,58	<b>9,01</b>
18			20,58		103,80	79,19		<b>79,62</b>	
19			381,06		464,28	256,67		257,10	
20			3291,38		3374,60	149,84		150,27	
21		4	1	629,32	125,35	754,67	0,45	38,15	<b>38,60</b>
22			113,93		743,25	601,24		<b>601,69</b>	
23			65,95		695,27	987,46		987,91	
24			3600		-	514,78		515,23	

Tableau 2 : Temps de calcul pour les deux approches

Pour l'étape 2, tel que déduit du tableau 1, les MIP ont été résolus à l'optimalité pour 14 instances avec la méthode exacte et 17 instances avec la méthode heuristique. Le temps moyen de résolution est de 545,81 secondes pour l'approche exacte (pour les 14 instances) et de 824,87 secondes pour l'approche heuristique (pour les 17 instances). Cet écart est dû aux 3 MIP des 3 instances non résolues à l'optimalité par la méthode exacte et qui l'ont été par la méthode heuristique (instances 10, 11 et 12). En effet, si nous considérons les instances qui ont été résolues à l'optimalité à l'étape 2 par les deux approches (il y en a 13 en tout), le temps de résolution est de 443,27 secondes en moyenne pour l'approche exacte et 568,03 secondes en moyenne pour l'heuristique. Donc, ces temps restent comparables.

Si nous refaisons ces calculs pour le temps de résolution total (étape 1 et 2), l'approche exacte résout à l'optimalité les 14 instances en 825,45 secondes en moyenne. L'approche heuristique résout les 17 instances en 825,19 secondes en moyenne. Pour les 13 instances résolues à l'optimalité par les deux approches à l'étape 2, le temps moyen de résolution pour la méthode exacte est de 707,79 secondes alors qu'il ne dépasse pas les 568,37 secondes pour l'heuristique.

Lors de l'analyse du tableau 1, nous avons mentionné que même si le MIP de l'étape 2 est résolu à l'optimalité avec la méthode heuristique, ceci ne garantit pas l'optimalité de la solution ainsi trouvée pour le VRP-RS puisque l'ensemble des tournées semi-réalisables considéré ne renferme pas toutes les possibilités. Nous avons également établi que 7 instances du VRP-RS au total ont été résolues à l'optimalité par l'heuristique. Les temps totaux de résolution de ces instances (marqués en gras dans le tableau 2 sous la colonne "1+2" de la méthode heuristique) varient entre 9,01 et 1491,69 secondes pour une moyenne de 327,34 secondes. Ces mêmes instances ont été résolues en 545,02 secondes en moyenne avec la méthode exacte.

En conclusion, les tests expérimentaux préliminaires menés montrent que l'approche exacte proposée arrive à résoudre les problèmes de petite taille à l'optimalité en des temps relativement courts. Ceci est dû entre autres aux restrictions imposées sur le nombre de visites maximum tolérées pour une tournée. Cependant, il est clair que lorsque le nombre de routes semi-réalisables est grand, une énumération complète de toutes les routes ne serait pas envisageable tant au niveau de la 1<sup>ère</sup> étape de génération que de la 2<sup>ème</sup> étape de résolution du MIP. Pour des problèmes de plus grande taille, l'approche heuristique proposée serait une bonne alternative. Les résultats obtenus montrent que pour la plupart des instances considérées dans cette étude préliminaire, les solutions heuristiques obtenues s'écartent relativement peu (en moyenne) de l'optimum. Le temps de résolution total de ces instances reste relativement petit.

## 6 CONCLUSIONS

Dans ce travail, nous avons proposé deux approches de résolution pour le problème de distribution d'aide humanitaire en situation d'urgence. Bien qu'ayant beaucoup de similarités avec le problème de tournées de véhicules multi-dépôts, multi-produits et multi-véhicules avec livraison partagée, le contexte de déploiement en situation d'urgence donne au problème de tournées considéré des caractéristiques qui lui sont propres (temps d'accès maximum, nombre de visites maximum par tournée, nombre de visites maximum par client, etc.).

Les deux approches proposées divisent le processus de résolution en deux étapes : une 1<sup>ère</sup> étape de génération de routes vides (dites semi-réalisables) et une 2<sup>ème</sup> étape de chargement et de sélection des meilleures routes. L'étape 2 est résolue via un modèle linéaire mixte en nombres entiers. La différence fondamentale entre les deux méthodes proposées réside dans le fait que pour l'approche, dite exacte, toutes les routes semi-réalisables prometteuses sont générées et passées au MIP de l'étape 2, alors qu'un ensemble restreint de routes semi-réalisables déterminé heuristiquement est passé au MIP avec l'approche heuristique.

Les résultats préliminaires obtenus montrent que l'approche exacte donne de très bons résultats (en termes de la qualité des solutions obtenues et des temps de calcul) pour les problèmes de petite taille. Pour les problèmes de plus grande taille, l'approche heuristique paraît plus prometteuse. Des tests numériques plus poussés seront nécessaires pour appuyer de telles affirmations.

L'approche heuristique proposée peut en fait être étendue à des problèmes de très grandes tailles. Dans nos travaux futurs, nous envisageons employer des méthodes de type recherche locale pour mettre à jour, de façon itérative, l'ensemble des routes semi-réalisables passé au MIP de l'étape 2.

## 7 REMERCIEMENTS

Ce projet n'aurait pu être réalisé sans le support financier du programme *Projet d'envergure de partenariat de recherche en microélectronique, photonique et télécommunication* (PROMPT), du *Conseil de recherches en sciences naturelles et en Génie du Canada* (CRSNG) dans le cadre d'une subvention *Recherche et Développement Coopérative* (CG095123), ainsi que du financement de DMR Une société Fujitsu. Ce support est grandement apprécié.

## 8 REFERENCES

Altay N. & Green III W. G., OR/MS research in disaster operations management. *European Journal of Operational*

- Research, 175, 2006, 475-493.
- Applegate D. L., Bixby R. E., Chv Gal V. et Cook W., The traveling salesman problem. A computational study. Princeton Series in applied mathematics, 2006.
- Balcik B., Beamon B. M. & Smilowitz K., Last mile distribution in humanitarian relief. *Journal of Intelligent Transportation Systems*, 12, 2008, 51-63.
- Campbell A. M., Routing under relief efforts. *Transportation Science*, 42, 2008, 127-145.
- Chern C. C., Chen Y. L. & Kung L. C., A heuristic relief transportation planning algorithm for emergency supply chain management. *International Journal of Computer Mathematics*, 2009, 1-27.
- Cordeau J.-F., Gendreau M., Laporte G., Potvin J.-Y. & Semet F., A guide to vehicle routing heuristics, *Journal of the Operational Research Society*, 53, 2002, 512-522.
- Gutin G. et Punnen A. P., The traveling salesman problem and its variations, Springer, 2007.
- Haddow G. D., Bullock J. A. & Coppola D. P. (2008), Introduction to Emergency Management, Butterworth-Heinemann homeland security series, Elsevier Inc.
- Jotshi A., Gong Q. & Batta R., Dispatching and routing of emergency vehicles in disaster mitigation using data fusion. *Socio-Economic Planning Science*, 43, 2009, 1-24.
- Laporte Gilbert, The traveling salesman problem: An overview of exact and approximate algorithms. *European Journal of Operational Research*, 59, 1992a, 231-247.
- Laporte Gilbert, The vehicle routing problem: An overview of exact and approximate algorithms. *European Journal of Operational Research*, 59, 1992b, 345-358
- Laporte G., Fifty years of vehicle routing. *Transportation Science*, 43, 2009, 408-416.
- Laporte G., A concise guide to the Traveling Salesman Problem. *Journal of the Operational Research Society*, 61, 2010, 35-40.
- Laporte Gilbert et Osman Ibrahim H., Routing Problems : A Bibliography. *Annals of Operations Research*, 61, 1995, 227-262
- 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.
- Lawler E. L., Lenstra J. K., Rinnooy Kan A. H. G. et Shmoys D. B., The traveling salesman problem. A guided tour of combinatorial optimization. John Wiley & Sons, 1985.
- Sheu J.-B., (2007) Challenges of emergency logistics management. *Transportation Research Part E*, 43, 655-659.
- Sheu J.-B., An emergency logistics distribution approach for quick response to urgent relief demand in disasters. *Transportation Research Part E*, 43, 2007, 687-709.
- Sheu J.-B., Dynamic relief-demand management for emergency logistics operations under large-scale disasters. *Transportation Research Part E*, 46, 2010, 1-17.
- Tzeng G.-H., Cheng H.-J. et Huang T. D., Multi-objective optimal planning for designing relief delivery systems. *Transportation Research Part E*, 43, 673-686, 2007.
- Toth P. et Vigo D., (2002) The vehicle routing problem. SIAM monographs on discrete mathematics and applications.
- Yi W. et Kumar A., Ant colony optimization for disaster relief operations. *Transportation Research Part E*, 43, 660-672, 2007.
- Yi W. & Özdamar L., A dynamic logistics coordination model for evacuation and support in disaster response activities. *European Journal of Operational Research*, 179, 2007, 1177-1193.