

CLASSIFICATION DE PROBLEMES DE TOURNEES DE VEHICULES

Mais HAJ RACHID

LIFC
1 cours Leprince-Ringuet BP 21126
25 201 MONTBELIARD Cedex
mais.hajrachid@lifc.univ-fcomte.fr

Wahiba RAMDANE CHERIF

Ecole des mines de Nancy
Parc de saurupt
54042 NANCY Cedex
wahiba.ramdane@loria.fr

**Christelle BLOCH
Pascal CHATONNAY**

LIFC
1 cours Leprince-Ringuet BP 21126
25 201 MONTBELIARD Cedex
bloch@lifc.univ-fcomte.fr
pascal.chatonnay@univ-fcomte.fr

RESUME : *Ce papier propose une classification des problèmes de tournées de véhicules (VRP). Les variantes de ce problème se distinguent généralement par la nature des données disponibles, les contraintes prises en compte et les objectifs visés. Ces variantes sont traditionnellement désignées par des sigles dans lesquels divers préfixes et suffixes entourant le sigle VRP indiquent la présence de différentes hypothèses ou contraintes. Face à la complexification croissante des variantes considérées, les sigles fleurissent dans la littérature, de plus en plus longs. En effet, ces nouveaux suffixes ou préfixes sont souvent créés selon les besoins, par chacun des auteurs, sans qu'aucune liste des sigles existants ne soit tenue à jour. Il en résulte des redondances et/ou des incompatibilités. En outre, l'utilisation d'un sigle devient insuffisante pour représenter des variantes de plus en plus complexes. Cet article propose de pallier ce manque à l'aide d'une notation basée sur un schéma du type $\pi/\alpha/\beta/\gamma$. Le champ π caractérise le problème, α décrit la structure du système, des ressources et des demandes, β décrit des contraintes et γ indique les critères à optimiser (objectifs). Cette notation est mise en application dans un état de l'art succinct afin d'illustrer son utilisation.*

MOTS-CLES : *Vehicle Routing Problem, Problème de Tournées de Véhicules, VRP, Classification.*

1. INTRODUCTION ET PROBLEMATIQUE

Les problèmes de tournées de véhicules sont très répandus en logistique. Il en existe une multitude de variantes, que l'on désigne généralement par des sigles pour les distinguer. Les années passant, l'intérêt croissant des chercheurs pour la logistique et la découverte de cas pratiques toujours plus complexes ont multiplié le nombre de sigles utilisés. Comme il n'existe ni référence commune ni gestion centralisée des sigles existants, on assiste dans la littérature à des dérives de ce système « d'identification » des instances de problème abordées. Il arrive que le même sigle soit utilisé pour désigner deux variantes différentes, ou a contrario deux problèmes identiques peuvent être désignés par des sigles distincts selon les auteurs. Cet article s'appuie sur une notation du type $\pi/\alpha/\beta/\gamma$ pour tenter de définir un formalisme commun (section 2) qui permette aux chercheurs de pallier ce problème. Par analogie avec les notations utilisées en ordonnancement d'ateliers de production, le champ π caractérise le problème, α décrit la structure du système, des ressources et des demandes, β décrit des contraintes et γ indique les critères à optimiser (objectifs). Cette notation est mise en oeuvre pour classer quelques articles du domaine afin d'illustrer son utilisation (section 3). Au préalable, la suite de la section 1 rappelle la signification (ou plutôt, dans bien des cas, les significations) donnée(s) aux différents sigles du domaine. Le plus connu des problèmes de tournées

(routing) est le Problème du Voyageur de Commerce (Traveling Salesman Problem ou TSP), qui consiste à calculer une tournée d'un vendeur visitant un ensemble de villes et retournant à la ville de départ. Ce vendeur doit visiter une et une seule fois chaque noeud (la tournée correspond à un cycle hamiltonien) dans un graphe non orienté complet et valué. L'objectif pour le TSP est de minimiser la distance totale parcourue. Le problème de tournées de véhicules (Vehicle Routing Problem, VRP) a été formulé en 1959 par (Dantzig et Ramser, 1959). C'est une généralisation du TSP, qui s'en distingue selon les auteurs par le nombre de véhicules, et/ou la contrainte de capacité et/ou la contrainte d'autonomie. La contrainte de capacité spécifie que la somme des demandes des clients regroupées en une tournée ne doit pas excéder la capacité du véhicule, sachant que la demande de chaque client est supposée inférieure à la capacité du véhicule, et que tous les véhicules sont ici de même capacité (flotte homogène). La contrainte d'autonomie indique que la durée maximale entre le départ d'un véhicule et son retour au dépôt est limitée par une borne maximale. Cette divergence de points de vue entre auteurs, a fait naître plusieurs définitions contradictoires du VRP dans la littérature, qui ont conduit (Sørensen, 2003) à identifier 4 types de VRP, correspondant à quatre des cas présentés ci-dessous, mais qui restent discutables :

- dans le premier cas, nommé « VRP de base » par (Sørensen, 2003), le VRP est distingué du TSP

uniquement par le fait que plusieurs véhicules soient disponibles. Mais alors par quoi se distingue-t-il du m-TSP, dans lequel « m » signifie également la présence de plusieurs voyageurs ?

- dans le second cas (Capacitated Distance-Constrained VRP ou CDVRP pour (Sørensen, 2003)) une contrainte de capacité des véhicules et une contrainte d'autonomie des véhicules séparent le VRP du TSP (voir par exemple (Cordeau *et al.*, 2005)) ;
- dans le troisième cas, la distinction repose uniquement sur la contrainte de capacité des véhicules (voir par exemple (Housroum *et al.*, 2005)) ; (Sørensen, 2003) parle alors de Capacitated VRP (ou CVRP). Ce sigle apparaît d'ailleurs également dans (Toth and Vigo, 2002) et il est sans doute l'un des sigles les plus utilisés. Pourtant, l'existence de ce CVRP pose à nouveau la question : « qu'est-ce qui distingue alors le VRP du TSP, si ce n'est pas la contrainte de capacité ? » et « qu'est-ce qu'un VRP sans contrainte de capacité ? ». Une explication se trouve peut-être dans (Cordeau *et al.*, 2005). En effet, pour ces auteurs, le VRP « de base » contient les deux contraintes (autonomie et capacité). Dès lors, le sigle CVRP est utilisé pour indiquer que le problème est un VRP dans lequel on ne trouve pas la contrainte d'autonomie et où ne subsiste que la contrainte de capacité.
- le quatrième cas est à nouveau une définition contradictoire avec les discussions précédentes, utilisée par (*) par exemple, elle distingue le VRP du TSP uniquement par la contrainte d'autonomie, c'est le Distance Constrained VRP, pour (Sørensen, 2003).
- enfin certains auteurs, comme par exemple (Kilby *et al.*, 2000), utilisent divers types de contraintes susceptibles de limiter la tournée (capacité, temps total, un nombre de clients maximum...) pour distinguer VRP et TSP.

1.1. Quelques variantes du problème VRP

La multitude d'applications du VRP dans de nombreux domaines, dont celui du transport et de la distribution, a fait naître dans la littérature de nombreuses variantes de VRP. La section suivante présente les plus connues.

Le Capacitated Vehicle Routing Problem (CVRP) est l'une des variantes pour lesquelles il existe des définitions contradictoires. Pour certains auteurs (Cordeau *et al.*, 2005) (Christiansen, 2007) elle se caractérise par la présence de la contrainte de capacité et l'absence de contrainte d'autonomie. Pour d'autres (Chen *et al.*, 2006), c'est un problème à plusieurs véhicules, avec contraintes de capacité et d'autonomie, et une seule visite par client.

Le Vehicle Routing Problem with Time Windows (VRPTW), ou VRP avec fenêtres de temps, quant à lui, spécifie que chaque client a une fenêtre de temps. Celle-ci est un intervalle de temps au cours duquel son service (par exemple le chargement ou le déchargement de marchandises) doit être accompli. Un véhicule peut arriver plus tôt, mais il doit attendre jusqu'à ce que le service soit possible. S'il arrive plus tard, le service ne peut pas être rendu et le client correspondant ne sera jamais satisfait. Dans ce cas, le problème est dit "à

contraintes dures" (Hard time window constraints). L'objectif du problème est alors de minimiser le nombre de véhicules et la distance totale parcourue pour servir les clients sans violer les contraintes de fenêtres de temps. Dans les modèles dits à contraintes molles (soft time windows constraints), les véhicules peuvent servir le client en dehors de sa fenêtre de temps mais au prix d'une certaine forme de pénalité. Bien que cette définition du VRP à fenêtre de temps soit la plus répandue, il est possible de rencontrer dans certaines variantes du problème des fenêtres de temps relatives aux horaires d'ouverture du dépôt ou aux horaires de travail du personnel (Ombuki *et al.*, 2006).

Le Vehicle Routing Problem with Backhauls (VRPB), comporte deux types de clients, soit receveurs (linehauls), soit livreurs (backhauls). Tous les produits livrés sont pris d'un dépôt et tous les produits prélevés sont retournés au dépôt.

Ce modèle général résulte en trois catégories de VRPB, (Parragh *et al.*, 2006a) :

- Le VRP with Clustered Backhauls (VRPCB), dans lequel toutes les livraisons sont effectuées avant le premier ramassage, comme (Brandao, 2006).
- Le VRP with Mixed Linehauls and Backhauls (VRPMB), dans lequel les ramassages et les livraisons peuvent être mêlés dans une même tournée, comme (Crispim et Brandao, 2005).

-Le VRP with Simultaneous Delivery and Pickup (VRPSDP), dans lequel chaque client peut être receveur et livreur en même temps, (Hoff et Løkketangen, 2006). Le Vehicle Routing Problem with Pick-up and Delivery (VRPPD) ou Problème de Ramassage et de Livraison est presque identique au VRPB à l'exception du fait que les produits livrés peuvent être pris, soit au dépôt, soit chez les livreurs et non uniquement au dépôt.

Ce modèle recouvre deux catégories de problèmes, (Parragh *et al.*, 2006b) : Dans la première (unpaired pickup and delivery points), les demandes des clients sont indépendantes, ce qui signifie que chaque unité ramassée (au dépôt ou chez un livreur) peut être employée pour livrer n'importe quel client receveur. Généralement, ce problème est désigné sous le nom de Pick-up and Delivery VRP (PDVRP) et il est mono produit, c'est-à-dire que tous les produits transportés sont du même type, comme par exemple dans (Chalasan et Motwani, 1999). Dans la seconde catégorie (paired pickup and delivery points), les demandes des clients sont dépendantes (liées): chaque transport doit lier une origine et une destination précises. Deux types de ce modèle coexistent : le Pickup and Delivery Problem (PDP) et le Dial-A-Ride Problem (DARP). PDP porte sur le transport des marchandises (Ambrosini *et al.*, 2004), tandis que DARP porte sur le transport de personnes (Aldaihani et Dessouky, 2003).

Le Stochastic Vehicle Routing Problem (SVRP), est un VRP dans lequel au moins un élément du problème est aléatoire. Les trois cas les plus connus de SVRP (Cordeau *et al.*, 2005) sont :

- 1) Le VRP with Stochastic Customers (VRPSC), où Pi représente la possibilité qu'un client i émette une

demande ;

2) Le VRP with Stochastic Demands (VRPSD), où la demande d'un client est une variable aléatoire ;

3) Le VRP with Stochastic Travel Times (VRPSTT), où le temps de service (s_i) d'un client (i) et le temps de trajet (t_{ij}) d'un arc (i, j) sont des variables aléatoires.

Le Periodic Vehicle Routing Problem (PVRP), ou Problème de Tournées de Véhicules Multi-Périodique (PTVMP) considère un horizon de planification à M périodes. Chaque client doit être visité k fois au cours de l'horizon ($1 \leq k \leq M$), et les demandes quotidiennes sont fixes (Lacomme *et al.*, 2005).

Le Multi-Depot Vehicle Routing Problem (MDVRP), comporte plusieurs dépôts dans lesquels sont localisés les véhicules. Chaque tournée d'un véhicule doit commencer et finir au même dépôt. De plus, chaque client doit être visité exactement une fois par l'un des véhicules situés dans les dépôts indiqués par ce client (Mingozi, 2005).

Le Dynamic Vehicle Routing Problem (DVRP) peut être défini comme un VRP où l'information nécessaire à la planification des tournées :

- n'est pas connue entièrement par le planificateur quand le processus de planification commence,
- peut changer après que les tournées initiales aient été construites.

Autrement dit, certaines données du problème dépendent explicitement du temps, comme l'apparition d'un nouveau client ou la fin de service d'un client (Bianchi, 2000).

Le Vehicle Routing Problem with Split Delivery (VRPSD ou SDVRP) remet en cause deux contraintes du problème classique :

- Chaque client peut être visité plus d'une fois si cela est nécessaire. Autrement dit, la demande d'un client peut être divisée sur plusieurs tournées.
- la demande de chaque client peut alors être plus grande que la capacité des véhicules (Archetti *et al.*, 2002).

Le Vehicle Routing Problem with Multiple Trips (VRPMT), se rencontre principalement lorsque la flotte de véhicules est petite. Dans ce cas, certains véhicules peuvent exécuter plusieurs tournées au cours d'une même période, en respectant une durée maximum (horizon de temps qui correspond à la durée de travail de chaque véhicule par période). Le VRPMT consiste à déterminer un ensemble de routes qui minimise le coût total de transport (Alonso *et al.*, 2006)

Le Vehicle Routing Problem with Satellite Facilities (VRPSF) aborde un aspect important du problème de tournées de véhicules en prenant en compte l'utilisation des outils satellites pour réapprovisionner des véhicules pendant les trajets. Si possible, le remplissage satellite permet aux conducteurs de continuer d'effectuer des livraisons jusqu'à la fin de leur service sans retourner au dépôt central. Ce cas se rencontre principalement dans la distribution des carburants (*).

Le NEARP (Node, Edge, Arc, Routing Problem) (Prins et Bouchenoua, 2004) est en fait la généralisation à plusieurs véhicules et à un graphe mixte d'un problème très important sur le plan théorique, le GRP ou General Routing Problem. Le GRP consiste à construire une

tournée de coût minimum visitant un sous-ensemble de noeuds et d'arêtes dans un graphe non orienté.

1.2. Limites de la notation existante

Dans cette section, il est démontré à travers quelques exemples de la littérature que la notation existante, conjuguée avec l'absence de gestion centralisée des sigles, peut conduire et a déjà conduit d'une part à utiliser deux notations différentes pour un même problème ou inversement à utiliser la même notation pour représenter deux problèmes différents. Les divers préfixes et suffixes entourant le sigle VRP peuvent être combinés pour indiquer la présence de différentes hypothèses ou contraintes. Ainsi, par exemple, l'appellation SDVRPTW désigne le « Split Delivery Vehicle Routing Problem with Time Windows », dans lequel chaque client peut être livré en plusieurs fois, mais sous des contraintes de fenêtres temporelles et l'appellation (VRPMVTTW) ou Vehicle Routing Problem with Multiple Vehicle Types and Time Windows, est un autre problème similaire au précédent sauf que la contrainte de « Split Delivery » est remplacée par une contrainte de « flotte hétérogène de véhicules ». Face à la complexification croissante des variantes de problème considérées, les sigles fleurissent dans la littérature, de plus en plus longs, sans pour autant que cela contribue à un positionnement clair des travaux dans la littérature. En effet, les nouveaux suffixes ou préfixes sont souvent créés selon les besoins, par chacun des auteurs, sans qu'aucune liste des sigles existants ne soit tenue à jour. Il en résulte des redondances (deux sigles distincts pour désigner des variantes équivalentes) et/ou des incompatibilités.

Par exemple, à ce jour, le préfixe S est utilisé par certains auteurs (Shen *et al.*, 2006) pour désigner le caractère stochastique du problème, alors que d'autres (Hayari *et al.*, 2003) l'interprètent comme étant l'aspect sélectif : seul un sous-ensemble de clients sera finalement visité si la capacité des moyens disponibles ne permet pas de répondre à l'ensemble des demandes. (Shen *et al.*, 2006) ont étudié un cas de problème de tournées de véhicules où les demandes et les temps de visite des clients sont stochastiques (VRP with stochastic demands and stochastic travel times). Alors que (Hayari *et al.*, 2003) ont traité un problème de tournées de véhicules où les tournées peuvent ne pas inclure tous les clients mais où chaque client visité doit l'être dans une fenêtre donnée de temps. Dans ce dernier cas, les clients visités sont choisis pour optimiser plusieurs objectifs qui sont : le profit total, la distance totale parcourue, la durée totale et la charge totale des véhicules. Les différences entre les caractéristiques des deux problèmes traités sont très grandes, mais malheureusement la même notation SVRP est utilisée dans les deux cas. De même, le préfixe SD, est employé par certains auteurs pour désigner le caractère stochastique comme (Cordeau *et al.*, 2005), tandis que d'autres auteurs l'utilisent lorsque la demande des clients peut être divisée sur plusieurs tournées (Vehicle Routing

Problem with Split Delivery) comme (Archetti *et al.*, 2002). D'autre part, (Parragh *et al.*, 2006a) ont identifié plusieurs notations existantes dans la littérature pour le problème VRP with Mixed Linehauls and Backhauls : PDP (Pickup and Delivery Problem) dans (Mosheiov, 1998) et MVRPB (Mixed Vehicle Routing Problem with Backhauls) dans (Ropke et Pisinger, 2006). Ainsi, ces exemples issus de la littérature montrent de manière flagrante les limites de ce système de notation. En outre, l'utilisation d'un sigle devient insuffisante pour représenter la conjonction d'hypothèses, de contraintes et d'objectifs que les variantes de plus en plus complexes abordées dans la pratique. C'est pourquoi la section suivante présente une proposition de notation des problèmes de tournées de véhicules. La principale difficulté rencontrée dans cette démarche est de sélectionner les paramètres les plus pertinents pour rendre la classification suffisamment complète et discriminante tout en étant la plus concise possible.

1.3. Autres classifications

Dans la littérature, les critères de classification diffèrent d'un auteur à l'autre. (Ghiani *et al.*, 2003) ont classé les VRP selon les caractéristiques des données (voir figure 1). Le problème est :

- statique si toutes les données sont parfaitement connues dès le début de la résolution,
- stochastique si au moins un élément du problème est aléatoire,
- dynamique si l'une au moins des données nécessaires à la planification dépend du temps. Dans ce cas, toutes les données ne sont pas disponibles au début de la résolution, de nouvelles données se présentent aléatoirement en cours de résolution et doivent être intégrées dans celle-ci.

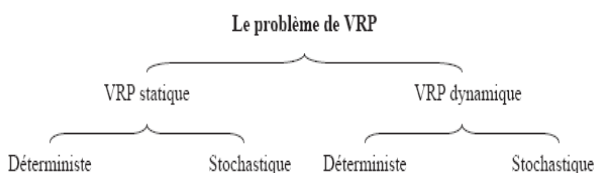


Figure 1. Classification selon la nature des données

(Parragh *et al.*, 2006a) (Parragh *et al.*, 2006b) proposent une classification de VRPB et VRPPD. (Desrochers *et al.*, 1990) ont proposé une classification des « Vehicle routing and scheduling problems ». Elle comporte quatre champs décrivant les adresses - dépôts et sites à visiter, les véhicules, d'autres caractéristiques du problème et les objectifs. Bien qu'elle soit très intéressante, notamment par son niveau de détail élevé (on spécifie par exemple la présence de compartiments dédiés sur un véhicule), elle n'a pas eu beaucoup de succès et n'a que peu été utilisée par la suite. Peut-être a-t-elle été proposée trop tôt, ou peut-être sa forme était-elle trop éloignée de celle des classifications auxquelles sont habitués les membres de la communauté ordonnancement. C'est pourquoi, nous proposons ici une notation relativement similaire à celle de (Desrochers *et al.*, 1990) en ce qui concerne le niveau

de détail. Mais la notation proposée s'appuie sur une adaptation de l'une des classifications les plus utilisées en ordonnancement d'ateliers, qui fut proposée par (Rinnooy Kan, 1976), et décrite également dans (Graham *et al.*, 1979) et (Blazewicz *et al.*, 1993). Espérons que cela augmentera ses chances d'être adoptée par la communauté. La notation de (Rinnooy Kan, 1976) inclut différents champs $\alpha/\beta/\gamma$ qui décrivent respectivement l'environnement de production, les tâches et les ressources et le critère à optimiser. Elle a déjà été adaptée pour classer divers types de problèmes, notamment les problèmes d'ordonnancement de robots sur les lignes de traitement de surface (ou Hoist Scheduling Problems, HSP (Bloch et Manier, 1999) et (Manier et Bloch, 2003), et les problèmes d'équilibrage de lignes d'assemblage ou Assembly Line Balancing (ALB) (Boysen *et al.*, 2006) (Boysen *et al.*, 2007). La section suivante détaille l'adaptation de ce schéma $\alpha/\beta/\gamma$ pour les problèmes de tournées de véhicules.

2. NOTATION POUR LE VRP

La notation proposée se construit ou se décrypte, pour un problème donné, à l'aide de règles simples et systématiques décrites ci-dessous. Elle comporte quatre champs $\pi/\alpha/\beta/\gamma$, dont l'un (α) décomposé en sous-champs ($\alpha 1$ à $\alpha 3$). Chaque champ (π , β , γ) ou sous-champ ($\alpha 1$ à $\alpha 3$) contient plusieurs paramètres. La séparation entre champs se fait par des « / », la séparation entre les sous-champs se fait par « ; » et entre les paramètres d'un même champ ou sous-champ elle se fait par des « , ». Notons la présence des séparateurs « / » et « ; » même en cas d'absence du champ ou du sous-champ précédent ce séparateur. Par exemple la notation $\pi/\alpha 1;\alpha 2;\alpha 3/\beta/\gamma$ exprime l'absence du champ β ; et l'absence des sous champs $\alpha 1$ (successivement, $\alpha 2$ et $\alpha 3$ en même temps) sera présentée par $\pi/;\alpha 2;\alpha 3/\beta/\gamma$ (successivement, $\pi/\alpha 1 ; ; / \beta/\gamma$). Une valeur par défaut est définie pour chaque paramètre. Cela permet de définir trois niveaux d'instanciation des paramètres. Niveau 1 : si un paramètre n'apparaît pas du tout dans la notation d'une instance de problème, c'est qu'il prend sa valeur par défaut. Ceci permet de ne pas surcharger la notation et d'obtenir le résultat le plus concis possible, en particulier pour les variantes simples de VRP. Niveau 2 : si le paramètre apparaît sans autre précision, c'est que l'hypothèse, la contrainte ou l'objectif correspondant apparaît dans le problème de manière statique et déterministe. Niveau 3 : la concaténation de plusieurs valeurs pour un même paramètre se fait avec des « : », et décrit des cas plus complexes. Après l'opérateur de concaténation « : », un ensemble de valeurs générales sont utilisables par chacun pour apporter de l'information complémentaire au lieu de se contenter de signaler la seule prise en compte du paramètre. Ces valeurs sont à choisir dans un ensemble décrit entre accolades { }, dans lequel les valeurs possibles sont séparées par des « - ». Pour certains paramètres les valeurs ne sont pas exclusives, plusieurs peuvent être

utilisées ensemble. Par exemple, dans l'ensemble {Ve - Wo - Dp - C -Net} des valeurs générales du paramètre Tw, il est possible d'utiliser à la fois Ve et C pour spécifier qu'il existe des contraintes de fenêtres temporelles pour les véhicules mais également pour les clients. En plus de ces valeurs générales prédéfinies, chacun est libre d'utiliser lorsque c'est nécessaire la valeur générique OT (Other), prévue pour modéliser les cas rencontrés dans la littérature et qui ne peuvent pas être représentés à l'aide des valeurs prédéfinies. De plus, l'ajout des lettres D ou S permet de spécifier le caractère dynamique ou stochastique. Enfin, les abréviations (Dp, Net, Ve, Wo, Dd, C, Q, Lo, Pr) définies dans la description qui suit peuvent être ajoutées pour préciser sur quel élément particulier portent la contrainte et/ou les caractères stochastique ou dynamique.

Finalement, le signe \leftrightarrow représente l'existence d'une relation entre deux sous-champs. Par exemple, lorsqu'il y a des contraintes de compatibilité entre des véhicules et des clients (ce qui se note $Ve \leftrightarrow C$).

Le tableau 1 résume la notation globale. Il contient en outre une colonne « Cas rencontrés » qui présente les cas qui ont été identifiés dans la littérature par les auteurs eux-mêmes lors de l'étude bibliographique menée pour aboutir à cette proposition de notation.

Les paragraphes suivants détaillent les paramètres constituant les différents champs et sous-champs.

2.1. Champ π :

Ce champ décrit le problème. Il comporte le sigle RP pour signifier qu'il appartient à la classe des Routing Problems (RP). Ce sigle a été choisi pour ne pas ré-utiliser l'un des sigles existants, comme VRP, et éviter ainsi toute ambiguïté quant à la définition du problème de base. Il ne signifie en aucun cas que cette notation est supposée apte à représenter tous les types de « routing problems » existants. De plus, le champ π décrit l'horizon de planification H. Par défaut, cet horizon ne comporte qu'une période mais peut être Multi période (MP).

2.2. Champ α :

Le champ α définit la structure du système, en trois sous-champs : $\alpha 1$ (description des ressources fixes : dépôt(s) (Dp) et réseau(x) (Net)), $\alpha 2$ (description des ressources mobiles : véhicules (Ve) et travailleurs (Wo)) et $\alpha 3$ (description des demandes (Dd) : clients (C), quantités (Q) et localisations (Lo)).

2.2.1. Sous-champ $\alpha 1$ (ressources fixes):

Ce sous-champ comporte trois points :

- Le type de dépôt : chaque dépôt peut-être livreur (backhaul, par défaut), receveur (linehaul Li), les deux à la fois (B, Li) ou un simple entrepôt (warehouse W) qui ne sert qu'à héberger les véhicules (donc ni livreur, ni receveur). La distinction entre collecte et livraison peut sembler inutile quand toutes les tâches sont du même type, car le passage d'un cas à l'autre est une simple inversion de flux, toutefois, il a paru préférable de

distinguer les deux types pour plus de clarté par rapport aux problèmes combinés (par exemple PDP).

- Le nombre de dépôts pour chaque type : égal à un (par défaut) ou supérieur à un (Multi-dépôt, MDP).

- Le type de réseau : le réseau peut être non orienté (par défaut), lorsque chaque tronçon de route a deux sens de parcours ; orienté (ON), si chaque tronçon a un seul sens de parcours ; ou mixte (MixN) contenant à la fois des arcs et des arêtes.

2.2.2. Sous-champ $\alpha 2$ (ressources mobiles)

Ce sous-champ détermine toutes les informations qui concernent les ressources mobiles (véhicules et travailleurs) :

- Le nombre de véhicules est illimité (par défaut), ou limité par une borne constante (cas statique et déterministe NVe) ou variable au cours du temps (cas dynamique NVe:D) ou défini par une loi stochastique (cas stochastique NVe: S)

- Le type de flotte : cette dernière peut être homogène (si elle est composée de véhicules identiques, valeur par défaut) ou hétérogène (Het, lorsque les véhicules ont des caractéristiques différentes, par exemple en termes de capacité ou de vitesse).

- Le nombre de travailleurs peut-être illimité (par défaut), limité de manière statique et déterministe (NWo), de manière dynamique (NWo:D) ou de manière stochastique (NWo:S). Le terme de travailleur représente toute personne qui contribue au service : conducteurs, réparateurs, etc.....

2.2.3. Sous-champ $\alpha 3$ (demandes)

Ce sous-champ caractérise les demandes, en particulier :

- Leur localisation : sur les noeuds (par défaut, comme dans le VRP), sur les arcs (A, comme pour l'ARP, Arc Routing Problem), sur les arcs et les noeuds, c'est-à-dire mixte (Mix, comme dans le GRP (voir section 1.1)).

- Le type de clients : receveur (par défaut), livreur (B), ou livreur et receveur en même temps (Li,B) comme par exemple dans le VRPSD (voir section 1.1).

- Le nombre de types de produit : égal à un par défaut, supérieur à un (Multi-produits MPr).

- La nature de la demande (Dd) : statique (par défaut), stochastique (Dd:S) ou dynamique (Dd:D). Dans ce dernier cas, il est possible de préciser sur quel paramètre porte l'aspect dynamique : le nombre de clients (Dd:D:C), les quantités (Dd:D:Q) ou les localisations (Dd:D:Lo).

- Le coût de service : ce dernier peut être nul (par défaut) ou non. S'il est non nul, il peut correspondre au temps pendant lequel le véhicule est arrêté chez le client (service time, Ser:T), ou à d'autres coûts, par exemple de chargement/déchargement, fixes ou proportionnels à la charge, (Other, Ser:OT). Si le coût de service est non nul (Ser:T ou Ser:OT), il est (par défaut) statique et déterministe ou variable au cours du temps de façon dynamique (Ser:T :D ou Ser:OT :D) ou encore défini par une loi stochastique (Ser:T :S ou Ser:OT : S).

- Le coût de transport : de même celui-ci peut être nul

(par défaut) ou non. Lorsqu'il est positif, le coût de transport inclut potentiellement des coûts fixes (par exemple l'acquisition de véhicules) ou proportionnels au nombre de produits, des coûts distinguant les trajets en haut le pied des trajets au cours desquels le service est rendu, des coûts énergétiques, etc... la notation prévoit deux types de coût classiquement utilisés, la distance parcourue (Tr:Dis) et le temps de trajet (travel time Tr:T), et regroupe les autres cas en un seul (Other, Tr:OT). De même que pour le coût de service, il est par défaut statique et déterministe (Tr:Dis,Tr:T ou Tr:OT) ou dynamique (Tr:Dis:D, Tr:T :D ou Tr:OT :D) ou stochastique (Tr:Dis:S, Tr:T : S ou Tr: OT : S).

2.3. Champ β (contraintes)

Le deuxième champ, β , décrit les contraintes du problème. En général, une contrainte est une restriction ou une condition portant sur une variable du problème. Dans la littérature des problèmes de tournées, de nombreuses contraintes existent en fonction du problème étudié. Cette section tente de recenser toutes les contraintes rencontrées dans la littérature :

- Capacité (par véhicule, dans le(s) dépôt(s) ou chez les clients): soit illimitée (par défaut), soit limitée statique et déterministe (Cap:Ve, Cap:Dp ou Cap:C).

- Autonomie : représente soit l'autonomie des véhicules, (durée maximale entre le départ d'un véhicule et son retour au dépôt), soit le temps de travail maximal des travailleurs, et peut être illimitée (par défaut), ou limitée, statique et déterministe (Aut:Ve ou Aut:Wo).

- Fenêtres de temps : ce type de contrainte permet de spécifier un (ou plusieurs) intervalle(s) de temps à respecter, que ce soit pour servir un client (TW:C), entrer dans le dépôt (TW: Dp), respecter la réglementation du temps de travail (TW:Wo), ou encore représenter la disponibilité des véhicules (TW:Ve) ou de certaines parties du réseau (TW : Net).

- Nombre de clients non servis : ce nombre représente le caractère sélectif ou non du problème. C'est-à-dire le fait que tous les clients ne sont pas forcément servis si le nombre et la capacité des véhicules ne le permettent pas. Dans ce cas, il faut choisir les clients à satisfaire en priorité. Par défaut, ce nombre est nul, sinon il est potentiellement non nul ≥ 0 (NoSer).

- Prise en compte des conditions de trafic : par défaut, le problème ne prend pas en compte les conditions de trafic. Dans le cas, contraire, il faut déterminer la nature de ces conditions : statiques (Tra), stochastiques (Tra:S) ou dynamiques (Tra:D).

- Multi-trips par véhicule (MT) : précise si les véhicules peuvent exécuter plusieurs tournées.

- Partage des demandes (split) : par défaut, la demande des clients doit être satisfaite en une seule fois, mais dans certaines variantes du problème chaque demande (même composée de plusieurs produits) peut être divisée entre plusieurs véhicules (SD). Dans d'autres variantes comme le VRP à compartiment (EL Fallahi *et al*, 2006) ; la demande concerne plusieurs produits, le « split » est

toléré par demande mais interdit par produit (SD:NoPr)
 - Planification du service : dans certaines variantes du VRP comme le « Periodic VRP » ou le « Split Delivery VRP », la demande peut être satisfaite en plusieurs visites de véhicules (plusieurs tournées). Une contrainte de planification de service est alors définie soit par une fréquence de visite (F) (c'est-à-dire un nombre de visites à respecter sur un horizon d'une ou plusieurs périodes), ou par un espacement (spacing) minimum et/ou maximum en périodes entre deux services successifs (Spa:Min~Max) ou encore par une liste de combinaisons de périodes par client (Comb) quand le client ne souhaite pas, par exemple, être servi à des périodes données.

- Retour de chaque véhicule à son dépôt d'origine : obligatoire (par défaut). Mais dans certains cas, comme dans l'OVRP (Open Vehicle Routing problem), les véhicules ne sont pas obligés de retourner au dépôt, ou lorsqu'ils y sont obligés, ils revisitent les clients dans l'ordre inverse (NoR).

- Origines des véhicules : par défaut, au cours d'une même période, tous les véhicules partent du même dépôt, mais il existe des cas où les véhicules partent de dépôts différents (MDpP).

- Affectation des dépôts : Par défaut, un véhicule est affecté à un dépôt, et n'en change pas quelle que soit la période considérée. Parfois le dépôt d'affectation d'un véhicule peut changer d'une période à l'autre (DpVar).

- Appariement des demandes : les points à visiter au cours des tournées sont généralement indépendants (unpaired), mais parfois les demandes des clients sont liées (Paired). Ainsi, dans les variantes de type PDP ou DARP, chaque transport lie une origine et une destination spécifiées par un même client.

- contrainte de compatibilité : par défaut il n'existe aucune contrainte de compatibilité, sinon plusieurs types de contraintes peuvent exister. Elles joignent certains paramètres des champs α_1 , α_2 et α_3 deux à deux pour exprimer des relations. Cela est utile dans différents cas, par exemple pour représenter :

- 1) une contrainte d'accès des véhicules à certaines rues, certaines parties du réseau ou à des dépôts,
- 2) le fait que des travailleurs doivent posséder une compétence particulière pour réaliser certaines demandes de clients,
- 3) le fait que des véhicules ne peuvent pas transporter certains produits,
- 4) le fait qu'un produit ne peut pas être stocké dans un dépôt donné...

2.4. Champ γ : (objectifs)

Ce champ décrit les critères à optimiser. Le problème peut consister simplement à déterminer les solutions faisables (par défaut) ou au contraire à minimiser un coût total. Toutefois, la littérature fait état de diverses fonction objectif (par exemple minimiser le nombre de

| | Libellé | valeur par défaut | Valeurs générales | Cas rencontrés | |
|---|----------------------------------|--|---|--|--|
| α | Horizon de planification | 1 seule période | MP (Multi Période) | | |
| Ressources Fixes $\alpha 1$ | Type de dépôt | Livreur (Backhaul) | Dp : { Li - (B , Li) - W } tels que Dp:Li [Receveur (Linehaul)] Dp:(B, Li) [livreur(Backhaul) , Receveur (Linehaul)] Dp:W [Entrepôt (Warehouse)] | | |
| | Nombre de dépôts | 1 seul dépôt | MDp (Multi-dépôts) | | |
| | Type de réseau (Network) | Réseau non orienté | tels que ON (Réseau orienté) MixN (Réseau Mixte) { ON - MixN } | | |
| Ressources mobiles $\alpha 2$ | Nombre de véhicules | Illimité | NVe (Limité, statique et déterministe) | NVe | |
| | | | | NVe : { S - D } | |
| | Type de Flotte | Homogène | Het (Hétérogène) | | |
| | Nombre de travailleurs (Workers) | Illimité | NWo (Limité, statique et déterministe) | NWo | |
| NWo : { S - D } | | | | | |
| Demandes $\alpha 3$ | Localisation | Noeuds | tels que A (Arcs) Mix [Mixtes(Arcs+Noeuds)] { A - Mix } | | |
| | Type de clients | Receveur (Linehaul) | tels que C:B [Livreur (Backhaul)] C:(Li,B) [Receveur (Linehaul), Livreur (Backhaul)] C: {B - (Li,B)} | | |
| | Nombre de types de produits | 1 seul type de produits | MPr (Multi-produits) | | |
| | Nature de demande | Statique | Dd | Dd : S (Stochastique) | |
| | | | | Dd : D : { C - Q - Lo } (Dynamique) | |
| | coût de service | \emptyset | Ser:T (Temps statique et déterministe) | Ser : { T- OT } | |
| | | | | Ser : { T- OT } : { S - D } | |
| coût de transport | \emptyset | tels que Tr:Dis (Distance statique et déterministe) Tr:T (Temps statique et déterministe) | Tr : { T- Dis - OT } | | |
| | | | Tr : { T- Dis - OT };{ S - D } | | |
| Contraintes β | Capacité | Illimité | Cap (Limité statique et déterministe) | Cap : { Ve - Dp - C } | |
| | Autonomie | Illimité | Aut (Limité statique et déterministe) | Aut : { Ve - Wo } | |
| | Time windows | \emptyset | Tw | Tw : { Ve- Wo- Dp- C- Net } | |
| | Nombre de clients non servis | \emptyset | NoSer (≥ 0) | | |
| | Conditions de trafic | \emptyset | Tra (statique et déterministe) | Tra | |
| | | | | Tra : { S - D } | |
| | Split Delivery | \emptyset | SD | SD | |
| | | | | SD : NoPr | |
| Multi-trips | \emptyset | MT | | | |
| Retour du véhicule à son dépôt original | Obligatoire | NoR (N'est pas obligatoire) | | | |

| | Libellé | valeur par défaut | Valeurs générales | Cas rencontrés |
|---------------------------------------|--|---|--|---|
| | Dépôt de départ des véhicules | D'un même dépôt | MDpP (Les véhicules partent de dépôts différents) | |
| | Planification du service | ∅ | { F - Spa:Min~Max - Comb } Tels que F (Fréquence du service) Spa:Min~Max (Espacement minimum (∞ si illimité) et maximum (∞ si illimité) entre deux services successifs pour un même client) Comb (Choix de service selon un ensemble de combinaisons de périodes) | |
| | Dépôt de départ d'un véhicule pendant l'horizon de planification | Un véhicule part toujours d'un même dépôt | DpVar (Le dépôt de départ d'un véhicule est variable) | |
| | Demandes appairées | Unpaired | Paired (appairées) | |
| | Compatibilités | ∅ | $\alpha i \leftrightarrow \alpha j$ $i, j \in \{1, 2, 3\}$ | $\alpha i \leftrightarrow \alpha j$ $i, j \in \{1, 2, 3\}$ tels que $\alpha 1 \in \{Dp, Net\}$ $\alpha 2 \in \{Ve, Wo\}$ $\alpha 3 \in \{C, Pr\}$ |
| Objectifs: γ | Coût à minimiser | Trouver des solutions faisables | { Tr:Dis - NVe - Delay - NoSer - Ser:T - Tr:T - WT - OT } Tels que Tr:Dis (Distance totale) NVe (Nombre de véhicules utilisés) Delay (Retard chez les clients) NoSer (Nombre de clients non servis) Ser:T (Temps de service) Tr:T (Temps de transport) WT (Temps d'attente chez les clients (Waiting Time)) OT (Other) | |

∅ : Non pris en compte {S - D} : { Stochastic or Dynamic } {C - Q - Lo} : {Customers or Quantities or Localisations}
 {T - OT} : {Time or Other} {Ve - Wo - Dp - C - Net} : {vehicles or Workers or Depots or Customers or Networks}

Tableau 1. Résumé des valeurs potentielles des champs de la notation

3. APPLICATIONS

véhicules utilisés (Nve), la distance totale (Tr:Dis) et/ou le temps de parcours (Tr:T), le temps de service (Ser:T), le retard total chez les clients (Delay), le nombre de clients non servis (NoSer), le temps d'attente chez les clients (WT ou Waiting Time) etc...).

Notons que certains de ces critères apparaissent déjà dans les champs précédents. Ceci s'impose pour distinguer les paramètres qui doivent être pris en compte (mais pas forcément comme objectif à optimiser) de ceux qui constituent effectivement les objectifs du problème. Par exemple, le coût de transport $Tr : Dis$ peut avoir à être considéré pour vérifier la contrainte d'autonomie dans un problème pour lequel l'objectif à minimiser est le nombre de clients non servis $NoSer$. $Tr : Dis$ n'apparaîtra alors que dans le sous-champs $\alpha 3$, alors que $NoSer$ apparaîtra dans β et dans γ . Inversement, $Tr : Dis$ peut être l'objectif à minimiser (apparaissant alors dans $\alpha 3$ et dans γ) dans un problème où $NoSer$ n'apparaît que dans β , uniquement pour signifier le caractère sélectif du problème, sans être lui-même un objectif.

Dans cette section, des applications de la notation proposée sur plusieurs articles de la littérature sont présentées. Un bref état de l'art décrit d'abord ces articles, avant de présenter les notations (voir tableau 2) résultant de l'utilisation du tableau 1.

(Alonso *et al.*, 2006) ont considéré un problème périodique de tournées de véhicules qui inclut, en plus des contraintes classiques, la possibilité pour un véhicule de faire plusieurs allers/retours par jour au dépôt tant que le temps maximum de travail du véhicule n'est pas dépassé ainsi que des contraintes d'accès des véhicules à certains clients. En effet, ces auteurs considèrent des contraintes de compatibilité entre les véhicules (une ressource mobile $\alpha 2=Ve$) et les clients (un élément de demandes $\alpha 3=C$). Les auteurs ont appelé ce problème SDMTPVRP (the Site-Dependent Multi-Trip Periodic VRP ou Periodic VRP with Multiple Vehicle Trips and Accessibility Restrictions). Ils ont proposé pour résoudre ce problème une heuristique basée sur un algorithme de recherche tabou.

Dans (Francis et Smilowitz, 2006), les auteurs présentent une formulation pour un problème périodique

de tournées de véhicules avec choix de services (PVRP-SC). Ce problème est caractérisé principalement par le fait que le service est déterminé par la fréquence de visite des clients. Ils ont proposé un modèle d'approximation continue pour le traiter.

(Housroum *et al.*, 2005) se sont intéressés au cas dynamique de problème de tournées de véhicules (DVRP). Après avoir présenté les caractéristiques propres à ce problème et quelques-unes de ses extensions (DVRPTW, DTRP, DTSPTW, DPDPTW), ils ont proposé une méthode de résolution approchée basée sur un algorithme génétique et ils ont développé un simulateur permettant de traiter ce type de problème. Ces auteurs ont conclu que l'algorithme génétique est une méthode alternative, efficace et flexible pour résoudre ce type de problème dynamique.

Plusieurs variantes du VRP (MDPVRP, PVRP, MDVRP, CVRP) ont également été abordées dans (Mingozzi, 2005). Cet auteur a décrit une formulation par programmation en nombres entiers du MDPVRP qui est une extension de la formulation du problème de partition d'ensemble (Set Partitioning formulation). Il a proposé une méthode exacte de résolution qui utilise une variable de tarification (variable pricing) afin de réduire l'ensemble des variables.

Dans (Cordeau et Laporte, 2002), les auteurs passent en revue dix des plus importantes heuristiques de recherche avec tabous pour le problème de tournées de véhicules. Ils les ont comparées et les résultats numériques montrent que les solutions obtenues par l'heuristique (Rochat et Taillard, 1995) sont presque optimales.

(Bianchi, 2000) a expliqué la notion de dynamique pour le problème de tournées de véhicules. Il a clarifié ses propriétés avant de fournir un état de l'art présentant les principales méthodologies de résolution des problèmes d'optimisation dynamiques.

| | |
|---------------------------------|--|
| (Alonso <i>et al.</i> , 2006) | RP (MP)/ ; NVe, Het ; Tr:Dis/ Cap:Ve, Aut:Ve, MT, F, Ve↔C/ Tr:Dis |
| (Francis et Smilowitz, 2006) | RP(MP)/ ; NVe ; Ser:T,Tr:T/ Cap:Ve, F/ Ser:T,Tr:T, OT |
| (Housroum <i>et al.</i> , 2005) | RP/ ; ; Dd:D:C, Tr:Dis/ Cap:Ve /Tr:Dis |
| (Mingozzi, 2005) | RP(MP)/MDp; NVe; Tr:OT/ Cap:Ve, F/ OT |
| (Cordeau et Laporte, 2002) | RP/ ; NVe ; Ser:T, Tr:Dis, Tr:T/ Cap:Ve, Aut:Ve/ Tr:Dis, Ser:T, Tr:T |
| (Bianchi, 2000) | RP/ ; NVe ; Dd:D:C, Tr:T/ Cap:Ve /Tr:T |

Tableau 2. Notations associées aux exemples considérés

4. CONCLUSION

Depuis plusieurs décennies, le VRP ou le problème de tournées de véhicules est l'un des problèmes d'optimisation combinatoire les plus étudiés. Et l'engouement actuel pour les problématiques de transport et logistique suscite un nombre de plus en plus important de travaux pour résoudre diverses variantes de ce problème. Ces variantes se distinguent généralement par la nature des données disponibles, les variables à

déterminer, les objectifs à optimiser, les contraintes à prendre en compte. Une notation a été proposée dans cet article pour identifier sans ambiguïté les problèmes de tournées de véhicules et les classer. Elle ressemble à la classification proposée par (Desrochers *et al.*, 1990) mais est basée sur un schéma du type $\pi/\alpha/\beta/\gamma$ pour améliorer ses chances de succès en reprenant un schéma classiquement utilisé. Le champ π caractérise le type de problème, alpha décrit la structure du système, des ressources et des demandes, bêta décrit des contraintes et gamma indique les critères à optimiser (objectifs). L'intérêt de ce travail est de proposer un formalisme commun susceptible d'être utile à toute la communauté. Le résultat s'adresse à toute personne s'intéressant à ce domaine, jeune doctorant découvrant le sujet, chercheur réalisant une étude bibliographique, ou industriel cherchant une réponse à un problème concret. Il doit lui permettre d'avoir une vision plus claire de l'état de l'art, en facilitant le positionnement de sa propre variante de problème et l'identification des variantes déjà résolues ou constituant au contraire des problèmes encore ouverts. Par conséquent, les auteurs encouragent tous les chercheurs à tirer profit de la classification proposée (et à proposer des évolutions si nécessaire) afin d'établir une référence publique pour toutes les publications (passées et futures) du Problème de Tournées de Véhicules (VRP).

5. REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient les membres du projet Vero&ClEO pour leur aide, le Groupe de Recherche « Recherche Opérationnelle » (GDR RO) dont le financement est un soutien précieux pour ce projet, ainsi que les rapporteurs de cet article pour leurs rapports très constructifs.

REFERENCES

- Aldaihani M. M. and M. M. Dessouky, 2003. Hybrid Scheduling Methods for Paratransit Operations. *Computers and Industrial Engineering*, V 45/1, p75-96
- Alonso F., M.J. Alvarez and J.E. Beasley, 2006. A Tabu Search Algorithm for the Periodic Vehicle Routing Problem with Multiple Vehicle Trips and Accessibility Restrictions. *To appear in Journal of the OR Society*.
- Ambrosini M., Caruso T., Foresti S. and Righini G., 2004. *A GRASP for the pickup and delivery problem with rear loading*. Information Technology Department Technical Report NO.65, University of Milan.
- Archetti C., A. Hertz and M.G. Speranza, 2002. A Tabu Search Algorithm for the Split Delivery Vehicle Routing Problem. *Mathematics of Information Technology and Complex Systems*,
- Bianchi L., 2000. Notes on Dynamic Vehicle Routing - The state of the art. *Technical report INDSIA-05-01*.
- Blazewicz J., K.H. Ecker, G. Schmidt and J. Weglarz, 1993. *Scheduling in Computer and Manufacturing Systems*. Springer-Verlag, Berlin.
- Bloch C. and M.A. Manier, 1999. Notation and Typology for the Hoist Scheduling Problem. *IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics*. Tokyo, Japan, Vol. 4, pp. 475-480.

- Boysen N., M. Fliedner and A. Scholl, 2006. A classification of assembly line balancing problems. *Wirtschaftswissenschaftliche Fakultät*.
- Boysen N., M. Fliedner and A. Scholl, 2007. Sequencing Mixed-Model Assembly Lines: Survey, Classification and Model Critique. *Friedrich-Schiller-University Jena, Department of Economics and Business Administration*.
- Brandao J., 2006. A new tabu search algorithm for the vehicle routing problem with backhauls. *European Journal of Operational Research*, 173:540–555.
- Chalasan P. and R. Motwani, 1999. Approximating capacitated routing and delivery problems. *SIAM Journal on Computing*. Vol 28, no.6, pp. 2133-2149.
- Chen A.L., G.K. Yang and Z.M. Wu, 2006. Hybrid discrete particle swarm optimization algorithm for capacitated vehicle routing problem. *Journal of Zhejiang University science A*. 7(4):607-614.
- Christiansen C. H., April 2007. Elements of Vehicle Routing under uncertainty. *PhD Thesis, Department of Business Studies, University of Aarhus*.
- Cordeau J-F., G. Laporte, 2002. Tabu search heuristics for the vehicle routing problem. *Technical Report G-2002-15, Group for Research in Decision Analysis*.
- Cordeau J.-F., G. Laporte, D. Vigo, M.W.P. Savelsbergh, 2005. Vehicle Routing, *Handbooks in Operations Research and Management Science*.
- Crispim J. and J. Brandao, 2005. Metaheuristics applied to mixed and simultaneous extensions of vehicle routing problems with backhauls. *Journal of the OR Society*, Vol 56, no.11, pp. 1296–1302.
- Dantzig G.B. and J.H. Ramser, 1959. The truck dispatching problem. *Operations Research, Management Sciences*, 6(1), pages 80–91.
- Desrochers, M., J. K. Lenstra, and M. W. P. Savelsbergh, 1990. A classification scheme for vehicle routing and scheduling problems. *European Journal of Operational Research*, 46(3), p. 322-332.
- El Fallahi A., and R. Wolfler Calvo, 2006. Un algorithme memétique pour le problème de tournées de véhicules multi-compartiments. *6er Conférence de Modélisation et Simulation – MOSIM'06*.
- Francis P. and K. Smilowitz, 2006. Modeling Techniques for Periodic Vehicle Routing Problems. *Conference Transportation Research Board 2006*.
- Ghiani G., F. Guerriero, G. Laporte and R. Musmanno, 2003. Real-Time Vehicle Routing : Solution Concepts, Algorithms and Parallel Computing Strategies. *European Journal of OR*. 151, pages 1–11.
- Graham R.L., E.L. Lawler, J.K. Lenstra and A.H.G. Rinnooy Kan, 1979. Optimization and Approximation in Deterministic Sequencing and Scheduling Theory: A Survey. *Annals of Discrete Mathematics*. V5, p287–326
- Hayari N., M.A. Manier, C. Bloch, A. El Moudni, 2003. Un Algorithme Evolutionniste pour le problème de Tournées Sélectives avec Contraintes de Fenêtres de Temps ». *Conférence de Modélisation et Simulation : Organisation et conduite d'activités dans l'industrie et les services (MOSIM'03)*, Toulouse, France.
- Hoff A. and A. Løkketangen, 2006. Creating lasso-solutions for the traveling salesman problem with pickup and delivery by tabu search. *Central European Journal of Operations Research* 14, 125-140.
- Housroum H., T. Hsu, R. Dupas and G. Goncalves, 2005. Une approche génétique “en ligne” pour la gestion de tournées dynamique. *Conférence MHOSI'2005 (Méthodologies et Heuristiques pour l'Optimisation des Systèmes Industriels)*. 24-26 Avril.
- Kilby P.J., P. Prosser and P. Shaw, 2000. A comparison of traditional and constraint-based heuristic methods on vehicle routing problems with side constraints. *Journal of Constraints* 5(4) 389-414 .
- Lacomme P., C. Prins and W. Ramdane-Cherif, 2005. Evolutionary algorithms for periodic arc routing problems. *European Journal of OR*. V 165. p.535-553
- Manier M.A. and C. Bloch, 2003. A classification for Hoist Scheduling Problems. *International Journal of Flexible Manufacturing Systems*. vol.15, no.1, pp.37-55, Kluwer Academic Publishers, ISSN 0920-6299.
- Mingozzi A., 2005. The multi-depot periodic vehicle routing problem. Book Chapter (Abstraction, Reformulation and Approximation), pp. 347-350.
- Mosheiov G., 1998. Vehicle routing with pick-up and delivery: Tour-partitioning heuristics. *Computers and Industrial Engineering*, 34:PP 669–684.
- Ombuki B.M., B.J. Ross and F. Hanshar, 2006. A Multi-Objective Genetic Algorithm Approach to the Vehicle Routing Problem with Time Windows. *Applied Intelligence*, v.24, n.1, pp. 17-30.
- Parragh S. N., K.F. Doerner and R. F. Hartl, 2006a. *A survey on pickup and delivery models Part I: Transportation between customers and depot*.
- Parragh S. N., K.F. Doerner and R. F. Hartl, 2006b. *A survey on pickup and delivery models Part II: Transportation between pickup and delivery locations*
- Prins C. and S. Bouchenoua, 2004. *A Memetic Algorithm Solving the VRP, the CARP and General Routing Problems with Nodes, Edges and Arcs*. Studies in fuzziness and soft computing. vol 166, pages 65-86.
- Rinnooy Kan A.H.G., 1976. *Machine Scheduling Problems: Classification, Complexity and Computations*. Nijhoff, The Hague.
- Rochat Y. and E.D. Taillard, 1995. Probabilistic Diversification and Intensification in Local Search for Vehicle Routing. *Journal of Heuristics*, 1:147-167
- Ropke S. and D. Pisinger, 2006. A unified heuristic for a large class of vehicle routing problems with backhauls. *European Journal of OR*. V 171:750-775.
- Shen Z., F. Ordenez, and M.M. Dessouky, 2006. The minimum unmet demand stochastic vehicle routing problem. *Working paper 2006-07*, University of Southern California.
- Sörensen K., 2003. *A framework for robust and flexible optimization using metaheuristics with applications in supply chain design*. PhD thesis, Universiteit Antwerpen Faculteit Toegepaste Economische .
- Toth P. and D. Vigo, 2002. *The Vehicle Routing Problem*, SIAM Monographs on Discrete Mathematics and Applications.

* Site Internet : <http://neo.lcc.uma.es/radi-aeb/WebVRP>