

## L'utilisation des heuristiques pour la résolution des problèmes de tournées de véhicules

### Résumé

Ce travail aborde des problèmes bien connus en recherche opérationnelle et rencontrés dans les entreprises de transport : les problèmes de tournées de véhicules.

En effet, un très grand nombre d'entreprises de transport aérien fluvial et routier doit quotidiennement faire face à ce type de problèmes. Ainsi le problème de l'optimisation du volet distribution dans la gestion de la chaîne logistique prend de plus en plus de l'importance. C'est la raison pour laquelle les problèmes de tournées de véhicules ont toujours constitué un grand axe de recherche en recherche opérationnelle, et de nombreux chercheurs ont développé des approches très variées pour le résoudre. La recherche de méthodes efficaces de résolution des problèmes de tournées de véhicules constitue une part très importante de l'optimisation combinatoire. Les algorithmes de résolution exacte, ou approchée sont de plus en plus efficaces pour ces problèmes très complexes et vouloir les résoudre de façon exacte peut être voué à l'échec compte tenu de la difficulté de certains d'entre eux. On a alors souvent recours aux méthodes heuristiques qui recherchent une solution réalisable proche de l'optimum en un temps de calcul raisonnable. La qualité des solutions obtenues a non seulement permis de montrer l'intérêt de ce type d'algorithmes, mais également a représenté une percée significative dans l'étude de ce problème.

Nous présenterons succinctement différentes approches heuristiques classiques et nous nous attacherons à mettre en évidence, les nouvelles approches (metaheuristiques) et les principales idées qui ont contribué à leurs succès.

**Mohamed Tahar DARBOUCHE**

Institut des sciences économiques  
et de gestion  
Centre Universitaire de Khenchela  
(Algérie)

### ملخص

يتناول هذا المقال مسائل معروفة في ميدان بحوث العمليات التي تواجهها مؤسسات النقل: ألا وهي مسائل دوران المركبات. هناك عدد كبير من مؤسسات النقل (الطريق، الجو أو البحر) التي تواجه يوميا معوقات خاصة بهذه المسائل، ولهذا السبب فإن مشكلة تحسين عملية التوزيع في إدارة سلسلة الإمداد أصبحت ذات أهمية قصوى.

### Introduction

Le problème de tournées de véhicules (dénoté PTV ou VRP pour *Vehicle Routing Problem*) est défini sur un graphe orienté ou non.

Soit un graphe  $G = (V, A)$  ou  $V = \{1, \dots, n\}$  représente les sommets ou les clients.

A chaque client  $i$  est associée une quantité  $d_i$  d'un bien qu'il faut livrer chez ce client.  $A$  est l'ensemble des arcs ou arêtes du graphe selon que l'on considère la version orientée ou non du problème. A chaque arête est associé un temps

ولهذا السبب كانت مشكلة دوران المركبات محورا رئيسيا تدور حوله الدراسات والبحوث، والتي تدعى ببحوث العمليات. وكننتاج لتلك الدراسات، فقد طور العديد من الباحثين مقاربات عديدة ومختلفة لحل هذه الإشكالية.

إن البحث عن مناهج ناجعة وفعالة لحل إشكالية دوران المركبات يشكل جزءا مهما من المثليات التوافقية.

إن الخوارزميات المعتمدة في الحل الدقيق أو تقريبية أصبحت أكثر فعالية نحو تلك الإشكاليات جد معقدة، كما أن محاولة إيجاد حل لها بصفة دقيقة قد يؤدي إلى الفشل نظرا لصعوبة بعض مسائلها. ولهذا، غالبا ما يلجأ الباحثون إلى مناهج تقريبية تبحث عن حل واقعي يقترب من الدقة في وقت معقول من الحسابات.

إن نوعية الحل المتحصل عليها لم تساهم فقط في إبراز أهمية هذه الخوارزميات، وإنما شكلت ثورة حقيقية وانطلاقة فعلية في دراسة المسائل المذكورة سابقا.

سنستعرض بصفة مختصرة مختلف المقاربات التقريبية الكلاسيكية مع الالتزام بتسليط الضوء على المقاربات والأفكار الجديدة التي ساهمت في نجاحها وتطويرها.

de trajet ou un coût  $C_{ij}$ . Une flotte de  $M$  véhicules identiques de capacité  $Q$  est localisée au dépôt. L'objectif du problème de tournées de véhicules consiste à déterminer un ensemble de  $M$  routes de coût total minimum tel que toutes les routes partent du dépôt et reviennent au dépôt et qu'on associe à chaque client  $V_i$  un volume  $Q_i$  de marchandise, en vérifiant que pour chaque véhicule le volume total des biens transportés ne dépasse pas sa capacité  $Q$ .

Ce problème de recherche opérationnelle a été décrit pour la première fois par Dantzig et Ramser en 1959.

Les problèmes de tournées de véhicules représentent une classe très importante de problèmes de recherche opérationnelle. L'enjeu économique et la complexité pratique comme théorique des problèmes les rends intéressants à étudier et de très nombreux chercheurs ont développé de nombreuses approches exactes et approchées pour les résoudre. De plus de très nombreux articles leur ont naturellement été consacrés et publiés ces dernières années faisant le point sur les différentes formulations et méthodes de résolution développées jusqu'à maintenant. On peut citer par exemple les articles de Bodin et al. (1983), de Laporte (1996).

L'objectif de ce travail n'est pas de dresser un inventaire exhaustif des problèmes et des méthodes de résolution dans ce domaine, vu le

nombre impressionnant de publications, ceci représenterait un travail considérable.

La première section de cette recherche est consacrée à la présentation non exhaustive des principales méthodes heuristiques, ainsi qu'une formulation mathématique du problème de tournées de véhicules

Dans la seconde section nous passerons en revue quelques approches basées sur les méta heuristiques autres que la méthode *tabou* et nous conclurons par la présentation d'un bilan portant sur ces dernières.

## **I - Méthodes exactes (optimales) et heuristiques**

### **1.1. Méthodes exactes et résolution**

#### **1.1.1. Méthodes exactes**

L'objectif des méthodes exactes est de trouver en un temps de calcul, le plus court possible une solution garantie optimale du problème considéré. Pour tous les problèmes de l'optimisation combinatoire, ceci reste en défit souvent difficile à relever.

Le principe général des méthodes exactes pour la résolution des problèmes de l'optimisation combinatoire consiste à énumérer implicitement et le plus efficacement possible, toutes les solutions du problème pour en extraire une solution optimale. Mais il est clair que ces méthodes se limitent à des problèmes de taille extrêmement petite. Néanmoins, il est important de noter, que les performances de plus en plus grandes des outils de résolution (informatique) de programmes linéaires ont changé la notion de petite taille.

#### **1.1.2. Résolution exacte**

Les premières modélisations de programmation dédiées aux problèmes de tournées de véhicules ont été proposées en 1987 par Kolen, Rinnooy Kan et Trienekens. Depuis un grand nombre de travaux a été effectué, ils portent essentiellement sur la programmation dynamique, la relaxation lagrangienne et la génération de colonnes.

Nous en donnons ici un exemple portant sur la programmation linéaire:

Soit un dépôt  $O$ , une flotte de camions  $K$ , caractérisé chacun par :

- Son coût fixe  $C_k$  ;
- Son autonomie  $a_k$  (en heures) ;
- Sa capacité  $q_k$  (en volume).

Il faut desservir un ensemble de clients  $i$  ( $i = 1, \dots, n$ ) représentant chacun une demande  $d_i$  ; de plus

- $t_i$  est le temps à consacrer au client  $i$
- $C_{ij}$  sont les coûts de passage (transport) du client  $i$  au client  $j$
- $t_{ij}$  sont les temps de passage du client  $i$  au client  $j$

Il n'est pas certain que l'on puisse servir tous les clients: aussi un indice de priorité  $\delta_i$  est attribué au client  $i$  (croissant avec l'importance du client).

Supposons que l'on désire tenir compte de trois critères :

- minimiser le coût de transport ;
- minimiser le coût fixe d'utilisation des camions ;
- minimiser la priorité des clients non desservis ;

par exemple en les agrégeant avec des poids respectifs  $\lambda_1$ ,  $\lambda_2$  et  $\lambda_3$ . Désignons les variables :

$$X_{ijk} = \begin{cases} 1 & \text{si le véhicule } k \text{ dessert le client } j \text{ après le client } i \\ 0 & \text{autrement} \end{cases}$$

$Y_j \geq 0$  et critères (variables intermédiaires).

Le problème se formule :

$$\min (\lambda_1 (\sum_i \sum_j C_{ij} \sum_k X_{ijk}) + \lambda_2 (\sum_k C_k \sum_j X_{0jk}) + \lambda_3 (\sum_j \delta_j \sum_i \sum_k X_{ijk}))$$

$$\sum_i \sum_k X_{ijk} \leq 1, \quad \forall j \quad (1)$$

$$\sum_i X_{ijk} - \sum_l X_{ilk} = 0, \quad \forall j, \forall k \quad (2)$$

$$\sum_i q_i \sum_j X_{ijk} \leq q_k, \quad \forall k \quad (3)$$

$$\sum_i \sum_j t_{ij} X_{ijk} + \sum_i t_i \sum_j X_{ijk} \leq a_k, \quad \forall k \quad (4)$$

$$\sum_j X_{0jk} \leq 1, \quad \forall k \quad (5)$$

$$Y_i - Y_j + n \sum_k X_{ijk} \leq n-1, \quad \forall i, j, i \neq j \quad (6)$$

- (1) : chaque client est desservi au plus une fois,
- (2) : un véhicule qui arrive en j doit en partir,
- (3) : respect des capacités des véhicules,
- (4) : respect de l'autonomie des véhicules,
- (5) : une seule initialisation des véhicules,
- (6) : élimination des sous-tours.

Il est évident que ce type de modèle d'optimisation combinatoire donne rapidement un problème de grande dimension, pratiquement impossible à résoudre.

C'est pourquoi les heuristiques sont particulièrement importantes pour résoudre les problèmes de tournées de véhicules.

## 1.2. Méthodes heuristiques

A ce niveau de l'exposé nous abordons la discussion sur les heuristiques (nous entendons par heuristique toute approche pouvant être mise en œuvre pour obtenir une solution dont l'optimalité ne peut être garantie), que les récents développements de la théorie de l'optimisation combinatoire ont grandement enrichi. Leur objectif principal est de construire une bonne solution en utilisant des principes souvent très simples.

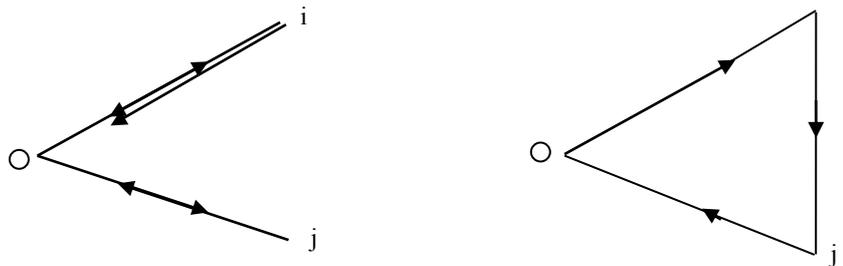
Nous proposons de classer les méthodes heuristiques pour la résolution du problème de tournées de véhicules en deux grandes catégories :

- les méthodes de construction
- les méthodes d'amélioration.

### 1.2.1. Heuristiques de construction

#### 1.2.1.1. Heuristique de Clarke et Wright

Une des premières heuristiques classiques de résolution du problème de tournées de véhicules a été proposée par Clarke et Wright (1964). Cette méthode très simple à implémenter est basée sur le calcul des gains (*saving*) engendrés par le rattachement des clients  $i$  et  $j$  dans la même tournée par rapport à une situation initiale où chaque client est desservi séparément (cf. figure). Ce regroupement n'est possible que si la somme de quantités délivrées le long de ces deux routes n'excède pas la capacité des véhicules.



Écartement de l'arête

L'écartement de l'arête, c'est-à-dire le gain en distance résultant du fait de réunir en une tournée les deux extrémités de l'arête sera :

Soient  $d_{0i}$  = distance du point  $i$  au dépôt  $o$   
 $d_{ij}$  = distance du point  $i$  au point  $j$   
 $c_{ij}$  = écartement de l'arête ( $i, j$ )

Si les points  $i$  et  $j$  sont visités séparément, la distance parcourue sera :

$$D1 = 2d_{0i} + 2d_{0j}$$

Si une seule tournée est organisée, la distance à couvrir sera :

$$D2 = d_{0i} + d_{0j} + d_{ij}$$

Le gain résultant de la liaison entre  $i$  et  $j$  sera donc :

$$c_{ij} = D1 - D2$$
$$c_{ij} = doi + doj - dij$$

En se basant sur cette heuristique, Wark et Holt (1994) ont développés et obtenu de meilleures solutions générées par l'algorithme de type constructif.

L'heuristique développée consiste à résoudre une suite de problèmes de couplage qui permettent de considérer simultanément la fusion d'un ensemble de tournées deux à deux.

Les coûts de couplage sont les économies qui peuvent être modifiées pour favoriser les tournées ni ne violent aucune contrainte (contrainte de volume ou contrainte de distance totale parcourue).

#### **1.2.1.2. L'heuristique de WREN et HOLLIDAY (1972)**

Cette méthode est aussi très simple elle consiste à parcourir le plan dans lequel sont localisés les clients en effectuant une rotation centrée sur le dépôt. Cette heuristique initialise une route pour le client le plus proche du dépôt. A chaque itération, on inclut dans la route le client le plus proche non encore desservi, tant que la capacité du véhicule n'est pas dépassée. Dès que la capacité limite est atteinte, on affectera les clients à un nouveau véhicule, et une nouvelle route est initialisée.

#### **1.2.1.3. L'heuristique de GILLET et MILLERT (1974)**

Cette méthode est la plus représentative des procédures qui accordent la priorité au regroupement avant la confection des tournées (*Route first-Cluster second*), construire des tournées d'abord et les regrouper par la suite.

Une première étape consiste à construire d'abord une tournée qui visite tous les clients par une méthode donnée. Elle consiste à effectuer un balayage rotatif autour du dépôt puis comme pivot. Chaque client rencontré est affecté à la tournée en cours de construction. Dès que la contrainte de capacité est violée, une nouvelle tournée est initialisée.

Dans certains cas, il est possible de rencontrer dans un même secteur des clients qui ne peuvent pas être visités ensemble par un même véhicule. Dans ce cas, l'heuristique est appliquée une seconde fois à tous ces clients. Solomon (1987)

#### **1.2.1.4. Les heuristiques de type pétales**

Laporte et Renaud (1996) ont proposé une heuristique de type pétale qui a donné les meilleurs résultats. Ces méthodes proposent de générer un ensemble de tournées prometteuses, puis à identifier un sous – ensemble de tournées conduisant a la meilleure solution.

### **2.2. Heuristiques d'amélioration**

Contrairement aux méthodes constructives dont l'objectif est de construire une bonne solution, les méthodes amélioratrices se proposent d'améliorer la valeur des solutions déjà existantes. Ces solutions existantes (initiales), sont le plus souvent le résultat d'une méthode constructive.

La plus part de ces méthodes utilisent la notion de voisinage. Il s'agit de trouver à chaque itération (échange de clients), une bonne solution qui améliore la fonction économique (dites méthodes de descente). Or, la difficulté principale provient du fait que les contraintes de fenêtres de temps (*time window*), imposent une orientation à la tournée, ce qui rend très complexe les procédures d'échanges de voisinages (clients), et par conséquent d'améliorer la solution.

Quelques essais d'heuristiques ont été proposés par Savelsbergh (1985) a propos d'une heuristique d'échanges de voisinages visant à améliorer la solution initiale sur des problèmes de tournées avec fenêtres de temps. Nous arrivons au terme de cette partie, non sans présenter dans le tableau suivant les résultats obtenus par les méthodes classiques : méthodes de *saving*, méthodes de couplage, méthodes de balayage et méthodes de pétale, sur un ensemble de 14 problèmes proposés par Christofides et Toth (1979). Ces instances se composent de 50 à 199 clients.

Les chiffres en gras indiquent que l'algorithme a permis d'obtenir la meilleure valeur connue.

**Tableau 1. Comparaison d'heuristiques classiques pour le problème de tournées de véhicules**

Instances	N	Méthode des économies <sup>(1)</sup>	Méthode de couplage <sup>(2)</sup>	Méthode de balayage <sup>(3)</sup>	Méthode de 2-pétales <sup>(4)</sup>	Meilleure valeur connue
1	50		<b>524,6</b>	531,9	<b>524,61</b>	524,61 <sup>(5)</sup>
2	75		835,8	884,20	854,09	835,26 <sup>(5)</sup>
3	100	578,56	830,7	846,34	830,40	826,14 <sup>(5)</sup>
4	150	888,04	1038,5	1075,38	1054,62	1028,42 <sup>(5)</sup>
5	199	878,70	1321,3	1396,05	1354,23	1291,45 <sup>(6)</sup>
6	50	1128,24	<b>555,4</b>	560,08	560,08	555,43 <sup>(5)</sup>
7	75	1386,84	911,8	965,51	922,75	909,68 <sup>(5)</sup>
8	100	616,66	878,0	883,56	877,29	865,94 <sup>(5)</sup>
9	150	974,79	1176,5	1220,71	1194,51	1162,55 <sup>(5)</sup>
10	199	968,73	1418,3	1526,64	1470,31	1395,86 <sup>(6)</sup>
11	120	1284,63	1043,4	1265,65	1109,14	1024,11 <sup>(5)</sup>
12	100	1521,94	<b>819,6</b>	919,51	824,77	819,56 <sup>(5)</sup>
13	120	1048,53	1548,3	1785,30	1585,20	1541,14 <sup>(5)</sup>
14	100	824,42	<b>866,4</b>	911,81	885,87	866,37 <sup>(5)</sup>
		1587,93				
		868,50				
Ecart en %]	Min.	0,25	0	0,84	0	
rapport à la	Moy.	6,72	0,64	7,18	2,43	
meilleure	Max.	11,87	2,31	21,4	6,43	
valeur connue			Max	5	Max.	
				Max.		

**Source** : Christofides et Toth, 1979.

(1) Version parallèle de la méthode de Clarke et Wright (1964) combinée avec une méthode d'amélioration de type 3-opt avec sélection du meilleur mouvement implanté par Laporte et Semet (1998).

- (2) Méthode de Wark et Holt (1994). Meilleure valeur parmi cinq résolutions.
- (3) Méthode de Gillett et Miller (1974) implantée par Renaud, Boctor et Laporte (1996).
- (4) Méthode de Renaud, Boctor et Laporte (1996).
- (5) Méthode de Taillard (1993).

Les heuristiques classiques les plus anciennes (méthodes de *saving* et de balayage) conduisent à l'obtention de solutions dont le coût total est en moyenne à environ 7 % de la meilleure valeur connue, et à 2.43% pour la méthode de pétales et 0.64% pour la méthode de couplage, accompagné d'un temps de calcul très faible de l'ordre de la seconde.

## II. Meta heuristiques pour le problème de tournées de véhicules

Apparu à partir des années 1980, un grand nombre d'heuristiques (du grec "heurein", découvrir), intelligemment flexibles, ont une ambition commune: Résoudre au mieux des problèmes réels dits difficiles.

Cette nouvelle génération d'heuristiques puissantes a réalisé des progrès importants en matière de méthodes approchées.

Alors que les heuristiques classiques sont conçues spécifiquement pour un type de problème donné, d'autres appelées metaheuristiques, ont le grand avantage d'être capable de s'adapter à différents types de problèmes combinatoires de plus grandes tailles ainsi que de très nombreuses applications qu'il était impossible de traiter auparavant, Laporte et Osman (1996).

Ces metaheuristiques constituent un ensemble de règles et de mécanismes généraux ayant comme fonction de contrôler et de guider la recherche de solutions dont la qualité est au delà de ce qu'il aurait été possible de trouver à l'aide d'une simple heuristique.

Le but de cette section n'est pas d'exposer toutes les metaheuristiques existantes, l'objectif est de présenter de manière générale les metaheuristiques les plus usitées pour le problème de tournées de véhicules.

Parmi ces méthodes, nous pouvons citer le recuit simulé (*simulated annealing*), les réseaux de neurones (*neural networks*), les algorithmes génétiques (*genetic algorithms*), et les colonies de fourmis.

Toutes ces metaheuristiques sont inspirées par des analogies: avec la physique, nous retrouvons le recuit simulé, avec la biologie nous retrouvons les algorithmes génétiques et avec l'éthologie, nous retrouvons les colonies de fourmis.

### 2.1. La méthode du recuit simulé

La méthode du recuit simulé a été développée en 1982 par Kirkpatrick et ces collègues Gelatt et Vecchi qui étaient des spécialistes de physique statistique, et qui se sont inspirés d'une analogie avec des phénomènes physiques. Cette méthode trouve donc ces origines dans la thermodynamique.

En métallurgie, cette méthode consiste à chauffer préalablement un matériau et le porter à l'état liquide, puis abaisser lentement la température en marquant des paliers suffisamment longs pour que le corps atteigne un état solide. Cette basse énergie se manifeste par l'obtention d'une structure régulière. En effet si l'on refroidit brusquement un matériau en fusion, celui ci présentera de nombreux défauts car il n'est

pas dans son état d'énergie minimum; c'est l'équivalent d'un **optimum local** pour un problème d'optimisation combinatoire. C'est pour cette raison que la descente de température se fait progressivement, les atomes se réarrangent, les défauts disparaissent et le métal a alors une structure ordonnée, c'est l'équivalent d'un **optimum global**.

### **2.1.1. Le recuit simulé adapté au problème de tournées de véhicules:**

L'idée d'utiliser le recuit stimulé pour la résolution d'un problème d'optimisation combinatoire consiste à introduire un paramètre de contrôle jouant le rôle de la température qui conditionne le nombre d'états accessibles (solutions réalisables) et conduit vers un système figé ou vers l'état d'énergie minimale (fonction objectif minimale).

L'efficacité de l'algorithme du recuit simulé appliquée aux problèmes d'optimisation dépend crucialement du choix des paramètres suivants:

- le choix d'une solution initiale
- le choix d'un voisinage.

La méthode du recuit simulé appliquée aux problèmes d'optimisations combinatoires, considère une solution initiale, le plus souvent inspiré par l'utilisation d'une méthode heuristique rapide de type Clarke et Wright, pour générer rapidement une solution initiale et recherche dans son voisinage une autre solution de façon aléatoire.

L'originalité de cette méthode est qu'il est possible de se diriger vers une solution voisine de moins bonne qualité avec une probabilité non nulle, ce qui permettra de sortir des optima- locaux ; c'est-à-dire de bonnes solutions mais qui ne sont pas les meilleures des solutions possibles.

La performance du recuit simulé dépend de la règle de refroidissement c'est-à-dire de la décroissance du paramètre utilisé  $T$ , apparenté à la température. Un refroidissement trop rapide mènerait vers un optimum local pouvant être de très mauvaise qualité, un refroidissement trop lent serait très coûteux en temps de calcul. Les premières adaptations du recuit simulé par le problème de tournées de véhicules sont celles de Robuste et Alfa (1990, 1991). Le nombre limité d'instances tests rend difficile l'évaluation de leurs performances et aucune des deux méthodes n'a été comparée avec d'autres approches.

L'une des meilleures implémentations du recuit simulé pour le problème de tournées de véhicules est celle proposée par Osman (1993). Il utilise de meilleures solutions de départ, et certains paramètres sont ajustés lors d'une phase d'essais et le refroidissement est plus sophistiqué. Ce qui conduit à déterminer la probabilité d'acceptation d'une solution de moins bonne qualité que la solution courante. Bien que cette méthode produise généralement de bons résultats, on peut constater parfois des solutions de mauvaise qualité et une très grande disparité dans la qualité de ces dernières. Au niveau des temps de calcul, ceux-ci sont élevés et globalement cette approche est peu compétitive par rapport aux meilleures heuristiques classiques.

### **2.1.2. Remarque :**

La méthode du recuit simulé est générale et facile à adapter à tout problème d'optimisation combinatoire. La convergence vers une bonne solution réside dans les réglages préalables et le savoir faire de l'utilisateur .ce dernier doit chercher un bon compromis entre la qualité de la solution obtenue et le temps de calcul qui sont généralement très élevés. Certaines études sont menées et se proposent actuellement d'améliorer l'efficacité de l'algorithme et son temps de calcul en procédant à des parallélisations et des hybridations avec d'autres algorithmes. En revanche, la méthode a l'avantage d'être simple vis-à-vis des évolutions du problème à implémenter, et elle a donné d'excellents résultats pour des problèmes le plus souvent de grande taille.

### **2.2. Approches basées sur les colonies de fourmis**

Cette approche due à Colomi, Dorigo et Maniezzo (1990), s'efface de simuler la capacité collective de résolution de certains problèmes observés chez une colonie de fourmis dont les membres sont pourtant individuellement dotés de facultés très limitées. Le principe vient de l'observation des fourmis qui sont guidées vers une source de nourriture à l'extérieur de la fourmilière. Il est remarquable que les fourmis suivent toujours le même chemin, et que ce chemin soit le plus court possible. Cette conduite est le résultat d'un mode de communication. En effet chaque fourmi dépose, le long de son chemin une substance chimique, dénommée "phéromone"; tous les membres de la colonie perçoivent cette substance et orientent leur marche vers les régions les plus odorantes.

Il en résulte la faculté collective de retrouver rapidement le plus court chemin, la première adaptation de la metaheuristique des colonies de fourmis et a été par Dorogo et al. (1992).

Cette méthode a été utilisée avec succès sur de nombreux problèmes (problème du voyageur de commerce), mais n'a pas permis de produire des résultats compétitifs.

Le problème du voyageur de commerce consiste à trouver le chemin le plus court reliant  $n$  villes données, chaque ville ne devant être visitée qu'une seule fois.

A ce jour peu d'études ont appliqué ce paradigme au problème de tournées de véhicules. La première étude a été proposée par Kawamura et al. (1998). La méthode est une approche hybride qui fait intervenir notamment une méthode d'amélioration de type 2-opt (deux arcs d'une tournée sont enlevés et remplacés par de nouveaux arcs afin de créer une nouvelle et meilleure tournée). A ce jour peu de tests ont été effectués sur l'efficacité de cette méthode. Bullheimer et Strauss (1999) ont proposé un algorithme inspiré des travaux de Dorigo. Ils proposent deux étapes essentielles : la première étape consiste en la construction de solutions et une mise à jour des degrés de phéromone.

Dans un premier temps une fourmi artificielle est placée en chacun des clients ( $n$ ). Dans ce cas les fourmis correspondent aux processus qui construisent les solutions pour le problème d'optimisation combinatoire considéré. Puis à chaque itération, chaque fourmi choisit le client suivant qu'elle visitera. A ce niveau les traces de phéromones correspondent à une mémoire commune qui est mise à jour à chaque fois qu'une nouvelle route est construite. Cette étape de construction s'achève lorsque chaque fourmi a visité l'ensemble des clients.

L'étape suivante consiste à ajuster selon les solutions obtenues les niveaux de phéromones sur les arcs du graphe. Dans un second article, les auteurs modifient leur algorithme, en ne considérant que le quart des clients les plus proches lors de la sélection du client suivant visité.

### **2.3. Approches basées sur les réseaux de neurones**

Initialement cette procédure n'avait pas d'ambition pour la résolution des problèmes d'optimisation combinatoire, elle était plutôt orientée pour la modélisation des processus d'apprentissage. Dès lors on ne rencontre pas beaucoup de travaux se basant sur cette metaheuristique pour proposer des méthodes pour le problème de tournées de véhicules. On peut identifier que l'essentiel des travaux émanent des auteurs Matsuyama (1991), Rezko (1995), et Ghaziri (1991,1996). Ce dernier a proposé un premier algorithme en 1991. Dénommée (*hierarchical deformable net*) HDN, cette metaheuristique définit d'abord un ensemble de tournées (anneaux). Chaque tournée est accompagnée d'un véhicule initialement vide. Le processus consiste à mettre ces anneaux en concurrence lors de l'insertion des clients. Le client sera effectivement affecté à un anneau par l'utilisation d'une distribution de probabilité.

La seconde approche (*supervised hierarchical deformable net*) SHDN, consiste à réaliser d'abord p insertion de clients selon la méthode HDN.

Les insertions suivantes sont déterminées non pas, selon un processus probabiliste mais en introduisant comme critère une fonction de coût qui dépend de la longueur totale des tournées. Dans le tableau suivant, composé d'un ensemble de 14 instances proposées par Christofides, Mingozzi et Toth (1979), nous retrouvons les résultats obtenus par les algorithmes basés sur le recuit simulé, les colonies de fourmis et les réseaux de neurones pour le problème de tournées de véhicules.

**Tableau 2. Résultats obtenus par des algorithmes bases sur le recuit simule, les colonies de fourmis et les réseaux de neurones pour le problème de tournées de véhicules**

Instances	n	Recuit simulé <sup>(1)</sup>	Colonie de fourmis <sup>(2)</sup>	Colonies de fourmis <sup>(3)</sup>	Réseau de neurones <sup>(4)</sup>	Réseau de neurones <sup>(5)</sup>	Meilleure valeur connue
1	50		<b>524,61</b>	<b>524.61</b>	545.10		524,61 <sup>(6)</sup>
2	75		870,80	844.31	-		835,26 <sup>(6)</sup>
3	100		879.43	832.32	911.20		826,14 <sup>(6)</sup>
4	150		1047.41	1061.55	1133.20		1028,42 <sup>(5)</sup>
5	199		1473.40	1343.46	1421.50		1291,45 <sup>(7)</sup>
6	50	528.00	562.93	560.24	567.30	539.2	555,43 <sup>(6)</sup>
7	75	838.62	948.16	916.21	-	-	909,68 <sup>(6)</sup>
8	100	829.18	886.17	866.74	902.40	-	865,94 <sup>(6)</sup>
9	150	1058.00	1202.01	1195.99	304.50	893.4	1162,55 <sup>(6)</sup>
10	199	1378.00	1504.79	1451.65	1604.30	1084.7	1395,86 <sup>(7)</sup>
11	120		1072.45	1065.21	1113.40	1401.4	1024,11 <sup>(6)</sup>
12	100	<b>555.43</b>	819.96	<b>819.56</b>	826.60	561.3	819,56 <sup>(6)</sup>
13	120	<b>909.68</b>	1590.52	1559.92	1645.80	-	1541,14 <sup>(6)</sup>
14	100	866.75	869.86	867.07	881.50	894.3	866,37 <sup>(6)</sup>
		1164.12				1264	
		1417.85				1580.4	
		1176.00				1102.4	
		826.00				825.1	
		1545.98				1608.5	
		890.00				879.8	
Ecart en % par rapport à la meilleure valeur connue	Min.	0	0	0	0.9	0.68	
	Moy	2.11	4.43	1.51	7.02	5.30	
	Max	12.85	14.09	4.03	14.93	13.22	
			Max	Max	Max.	Max.	

Source : Christofides et Toth, 1979.

- (1) Méthode de Osman (1993)
- (2) Méthode de Bullnheimer, Hartl et Strauss (1999a)
- (3) Méthode de Bullnheimer, Hartl et Strauss (1999b)
- (4) Méthode HDN, Ghaziri (1996)
- (5) Méthode SHDN, Ghaziri (1996)

Nous constatons que les méthodes HDN et SHDN présentées dans le tableau ci-dessus sont peu intéressantes en terme de qualité de solution, en effet elles se situent à une moyenne de 6.72% des meilleures valeurs connues obtenues par l'heuristique classique des *saving* (Clarke et Wright) et sont clairement dominées par l'heuristique basée sur les 2-pétales. Au niveau des temps de calcul, ceux-ci sont relativement élevés et varient entre 50 et 3000 secondes.

### Conclusion

A l'issue de ce tour d'horizon des méthodes actuelles de résolution des problèmes de tournées de véhicules nous avons présenté une méthode de résolution exacte et des méthodes approchées qui seraient plus appropriées pour la résolution des problèmes de tournées de véhicules.

Il nous est apparu que les méthodes issues de la littérature pouvaient ne pas être suffisantes lorsqu'elles sont appliquées à des problèmes académiques réels tel que le problème de tournées de véhicules.

Une combinaison de ces méthodes avec des méthodes parallèles et coopératives serait un choix judicieux et permet d'éviter d'être piégé dans certains optima - locaux.

Nous résumons ci-dessous les principales caractéristiques des meta heuristiques :

- *Simplicité*: Les metaheuristiques reposent sur des principes simples et intuitifs.
- *Généralités*: Les metaheuristiques sont applicables à une large gamme de problèmes d'optimisation.
- *Absence de garantie de performance*: Les metaheuristiques sont des procédures qui ne garantissent pas de découvrir l'optimum ni de s'en approcher, elles sont destinées essentiellement à la résolution de problèmes de grande taille.

Finalement, les méthodes basées sur les metaheuristiques sont à ce jour des algorithmes spécialisés et très complexes, et malgré les résultats très encourageants obtenus pendant ces dernières années, beaucoup d'efforts sont encore nécessaires aux chercheurs désirant continuer dans l'exaltante voie menant à la résolution des problèmes combinatoires les plus difficiles.

### Bibliographie

- Bullnheimer B., Hartl R.F. et Strauss C. (1999). An Improved Ant System Algorithm for the Vehicle Routing Problem. *Annals of Operations Research* 89, 319-328.
- Bodin L.D., Golden B.L., Assad A.A. et Ball M.O. (1983). Routing and Scheduling of Vehicles and Crews. The State of the Art. *Computers and operations research* 10, 69-91.
- Christofides N., Mingozzi et Toth P. (1979). The Vehicle Routing Problem ; Combinatorial Optimization. Wiley, Chichester, pp. 315-338.
- Clarke G. et Wright J. (1964). Scheduling of Vehicles from a Central Depot to a Number of Delivery Points. *Operations Research* 12, 568-581.
- Dantzig G.B. et Ramser J. (1959). The truck Dispatching Problem. *Management Sciences* 6, 81-91).

- Ghaziri H. (1991). Solving Routing Problems by a self-Organizing Map. In Kohonen T., Makisara K., Simula O. ; Kangas J. (éditeurs). Artificial Neural Networks, vol. 1. North-Holland, Amsterdam ; pp. 829-834.
- Ghaziri H. (1996). Supervision in the Self-Organizing Feature Map : Application to the Vehicle Routing problem. In Osman I. H., Kelly J.P. (éditeurs). Meta-Heuristics : Theory and Applications. Kluwer, Boston, pp. 651-660.
- Kawamura et Al. Cooperative search on pheromone communication for vehicle routing problem. IEEE, 81 : 1089-1096, 1998.
- Kirkpatrick, Gellat et Veceni. Optimisation by simulated annealing science, (220), 671-680, 1983.
- Laporte G. Et Renaud. The vehicle routing problem : An overview of exact and approximate algorithms, EJOR 59, pp 345-358, 1992.
  
- Naudin E. L'utilisation de meta heuristiques pour le probleme de redistribution, ROADEF, Nantes, janvier 2000.
- Nagih A et Soumis F. Agrégation des contraintes de ressources en chaque noeud dans un problème de plus court chemin. Technical report, G 2000- 47, Montreal, Canada 2000.
- Osman I.H. Meta strategy simulated annealing and tabou search algorithms for the vehicle routing problem, 41 : 421-451, 1993.
- Savelsbergh M. Local search in routing problems with time windows, annals of operations research, 4 :285-305, 1986.
- Teghem Jacques «La programmation linéaire » Edition Université Bruxelles/Ellipses (1996).
- Wren A. et Holliday A. « Computer scheduling of vehicles from one or more depots to a number of delivery point » O.R.Q., 23, n°3 (1972), p. 333.