

High productivity hole machining in Inconel 718 with SiAlON tools

Aitor Arruti, ...

*Danish Advanced Manufacturing Centre - Herning, Denmark
Mondragon Unibertsitatea - Arrasate, Spain*

???

???

Abstract

Inconel 718 is the most employed superalloy in the industry and it is often found in aerospace engines and power generation turbines. Superalloys are known as one of the most difficult group of materials to machine and therefore, tool material, tool geometry and cutting parameters should be carefully selected. Numerous researches have proven the enhanced productivity in turning of ceramic tools compared to carbide ones, while considerably less information is with regard to milling. Moreover, no knowledge has been developed about machining holes with this type of tools. More research on different machining techniques like circular ramping is critical to expand the productivity improvements that ceramics offer. This paper initially reviews prior work about ceramic tools. Then, a 3D simulation and a number of experiments with SiAlON round inserts have been carried out to evaluate the effect of the cutting speed and pitch on the tool wear and chip generation. The results show that three different types of chips are generated as well as that there are three potential wear zones. Top slice wear was identified as the most critic wear type followed by the notch wear. Flank wear and adhesion were also found in most of the tests. To conclude with, a 6.6 times more productive process than with carbide tools was achieved.

Cet article étudie deux méthodes utilisées dans le cadre du transport humanitaire en cas de crise (désastre, épidémie...). Le *Covering Tour Problem* se focalise sur l'équité de distribution des vivres, alors que le *Capacitated Vehicle Routing Problem* se concentre sur l'urgence de la distribution. Nous proposons une nouvelle approche mélangeant ces deux approches pour former une solution à la fois équitable et rapide. Ce article a été rédigé dans le cadre du TER¹ 2014-2015.

Keywords: CCVRP, CTP, CTP-CCVRP, CTP-VRP, Logistique de crise humanitaire

1. Introduction

Heat resistant super alloys (HRSA), also called *super-alloys* or *high temperature alloys*, are alloys that exhibit an excellent mechanical strength and resistance to creep at high temperatures, good surface stability, and corrosion and oxidation resistance. They are generally divided in three groups depending on the predominant alloying element : Iron-, Cobalt- and Nickel-base alloys. The latter are the most widely used ones, group to which belongs Inconel 718, the most employed superalloy in the industry

La logistique humanitaire intervient afin d'assurer l'organisation matérielle d'une organisation humanitaire. Elle se distingue de la logistique classique par les contraintes humaines qu'elle impose. Campbell et al. (2008) distingue

deux de ces contraintes par leur importance dans le cas humanitaire : l'urgence, c'est à dire le besoin d'une distribution rapide en cas de crise, et l'équité de la distribution, c'est à dire la nécessité que tous les habitants aient accès à l'aide sans distinction d'éloignement.

Par ailleurs, il convient de distinguer trois phases de la logistique humanitaire. La première, dite *phase de préparation*, consiste par exemple à conserver un stock permanent pour permettre une réponse rapide à l'urgence. La seconde, la *phase de réponse à l'urgence*, a pour objectif la mise à disposition de vivres aux habitants des zones sinistrées. Enfin, la dernière phase dite *phase de reconstruction* intervient dans le long terme. Elle tire notamment une grande part de son savoir-faire dans les valeurs du développement durable.

La seconde phase combine à la fois les critères d'urgence et d'équité. C'est précisément sur cette phase que notre travail se porte.

1. Travail encadré de recherche. Il s'agit d'un travail de trois mois, par équipe de 4 à 5 étudiants, effectué durant le long du deuxième semestre de M1 informatique, à l'université Toulouse 3 — Paul Sabatier.

2. État de l’art

2.1. Restriction du domaine d’étude

De nombreux problèmes de logistique liés à la phase de réponse à l’urgence ont été étudiés dans la littérature. Nous avons choisi de nous restreindre à la catégorie des problèmes de transport (qui est une composante de la logistique) dans le cas statique (c’est à dire où la demande n’évolue pas dans le temps) et où la demande est déterministe (elle ne relève pas de processus stochastiques et est connue sans incertitude).

Seuls deux problèmes, à notre connaissance, appartiennent à cette catégorie : le *Covering Tour Problem* (CTP, discuté en section 2.2) — et ses variantes — et le *Cumulative Capacitated Vehicle Routing Problem* (CCVRP, discuté en section 2.3).

2.2. Le Covering Tour Problem

Le *Covering Tour Problem* (CTP) est caractérisé par un ensemble d’habitants et un ensemble de points de distribution. Introduit par Gendreau et al. (1997), ce problème prend en compte le fait que tous les habitants ne peuvent être visités par un camion, mais que les habitants sont capables de se déplacer vers le point de distribution le plus proche. La distance maximale que peut parcourir un habitant est fixée — on appellera le rayon de couverture cette distance. Le schéma en figure 2 donne un exemple de solution à ce problème.

Ce problème respecte ainsi le principe d’équité dans l’accès à l’aide. L’objectif du CTP peut être séparé en deux étapes (Jozefowicz et al., 2007). D’abord un *Set Covering Problem* (SCP), où on détermine un sous-ensemble minimal de points de distributions permettant la couverture de tous les habitants. Ensuite, un *Travelling Salesman Problem* (TSP), où on détermine le circuit de distance minimale d’un unique camion à capacité illimitée à travers ce sous-ensemble de points de distribution.

L’article de Gendreau et al. (1997) cite plusieurs exemples théoriques d’utilisation du CTP : il pourrait être utilisé pour localiser les endroits optimaux pour placer des boîtes de poste, ou construire une route pour les équipes de réapprovisionnement de biens dans des pays en développement, dans lesquels les services médicaux ne peuvent être délivrés qu’à un ensemble de villages, mais où tous les habitants sont capables de marcher jusqu’au centre médical le plus proche (l’équivalent du point de distribution dans notre article).

L’article de Hodgson et al. (1998) implémente le CTP de Gendreau et al. (1997), et pour la première fois dans un cas réel : l’acheminement de biens vers des centres de réapprovisionnement du Suhum District au Ghana. Cette étude distingue deux saisons : la saison sèche et la saison des pluies. Durant la seconde saison, certains points de distribution accessibles durant la saison sèche deviennent inaccessibles par la route, il faut donc pouvoir établir un nouveau parcours pour distribuer un maximum d’habitants. Cet article s’intéresse à ce problème en étudiant les

conséquences du choix du rayon de couverture des points de distribution.

L’article de Naji-Azimi et al. (2012) se concentre sur le choix du placement de points de distribution secondaires approvisionnés depuis un dépôt unique par une flotte de camions non homogène : tous les camions ne transportent pas la même charge et ne transportent pas tous les mêmes types d’aide. Comme dans le cas du CTP classique, ces points de distributions doivent être déterminés pour permettre à chaque habitant d’être suffisamment proche d’un point de distribution. Ce CTP à plusieurs véhicules avait déjà été proposé par Hachicha et al. (2000) (*multiple-vehicle CTP*, m-CTP), mais Naji-Azimi et al. (2012) introduit une nouvelle notion de division de la distribution : un habitant peut être desservi par deux points de distribution.

2.3. Le Cumulative Capacitated Vehicle Routing Problem

Dans son article, Campbell et al. (2008) remet en question l’utilisation des algorithmes de transport classiques dans le cas humanitaire. Il est expliqué que les notions d’urgence et d’équité ne sont pas respectées : la minimisation de la distance ne convient pas à l’aide humanitaire. L’une des deux formulations présentées, le *Minimum-Average VRP* (minavg-VRP), est une formulation équivalente du *Cumulative Capacitated Vehicle Routing Problem* (CCVRP) défini plus tard par Ngueveu et al. (2010) : à partir de plusieurs camions de capacité homogène, on veut trouver des tournées pour livrer un ensemble d’habitants. Contrairement au CTP, tous les habitants doivent être atteignables. Et contrairement au *Vehicule Routing Problem* (VRP), qui minimise la distance parcourue par les camions en autorisant plusieurs camions, le CCVRP utilise une fonction objectif qui minimise la somme des temps d’arrivée chez les habitants.

Ngueveu et al. (2010) montre que le CCVRP aura tendance à utiliser le plus de camions possible par souci de rapidité, contrairement au VRP qui aura tendance à utiliser le moins de camions possible par souci d’économie.

3. Analyse de l’existant et proposition d’un nouveau modèle

3.1. Constat et proposition

Comme le suggère Campbell et al. (2008), la minimisation des coûts lors du choix d’un itinéraire ne permet pas d’assurer des temps d’arrivée convenables lorsqu’il s’agit de distribution d’aide humanitaire, et le CCVRP (ou minavg VRP) donne de bonnes solutions respectant le critère d’urgence mais sans prendre en compte l’impossibilité d’accéder à tous les habitants, et donc ne respectant pas le critère d’équité. Au contraire, le CTP règle cette impossibilité, mais en gardant une fonction objectif basée sur la minimisation de la distance parcourue : le critère d’équité est pris en compte mais celui d’urgence ne l’est pas. Ce comparatif est résumé en figure 1.

Contrairement au CTP classique qui n'autorise qu'un seul véhicule, le CCVRP permet l'utilisation de plusieurs véhicules. Une variante du CTP, le *Multi-Vehicle Covering Tour Problem* (m-CTP) proposée par Hachicha et al. (2000) et reprise dans Naji-Azimi et al. (2012) permet d'élargir le problème en disposant de plusieurs camions à capacité limitée.

Nous proposons un modèle de CTP multi-véhicules qui où l'on remplace la minimisation de la distance parcourue (la composante VRP du CTP) par la minimisation de la somme des temps d'arrivée aux points de distribution. Nous appellerons ce modèle *CTP-CCVRP*. Le modèle mathématique se trouve en section 3.7. Ce modèle permettrait par exemple de diffuser des médicaments liés à une épidémie à travers des points de distribution. Ainsi, les habitants auraient accès aux traitements le plus rapidement possible.

Pour comparer ce nouveau modèle, nous avons pris comme référence le modèle proposé par Naji-Azimi et al. (2012). Bien que très proche du m-CTP, il ajoute le partage de la distribution entre véhicules. Nous appellerons CTP-VRP ; le modèle mathématique est en section 3.6.

3.2. Méthodes de résolution utilisées

Le modèle du CTP-CCVRP ainsi que la référence CTP-VRP sont formulés en programmation linéaire en nombres entiers (PLNE) à partir du modèle de donné dans Naji-Azimi et al. (2012). Les formulations PLNE sont disponibles en section 3.6 et section 3.7, et le modèle GLPK est disponible sur le dépôt GitHub : <https://github.com/aheba/ctp/>.

L'instance est identique pour tous les tests. Elle a été créée arbitrairement et reprend l'exemple donné de Naji-Azimi et al. (2012). Chaque habitant est couvert par au moins deux points de distribution pour que la partie SCP du CTP ait du sens et qu'un choix soit possible dans le sous-ensemble de points de distribution.

Nous avons utilisé le solveur *GLPK* sur un Macbook Air 11" de mi-2011 à 1.6 Ghz. S'agissant de PLNE et donc de méthode exacte, l'instance utilisée est suffisamment petite pour que le temps de calcul ne dépasse pas 60 minutes.

3.2.1. Légende des figures

Dans chaque figure, qu'il s'agisse du CTP-VRP ou du CTP-CCVRP, l'arc de retour n'est pas affiché pour alléger les figures. Mais l'arc de retour est bien compté dans le calcul de la distance parcourue.

3.2.2. Explication des tables de résultat

L'écart est calculé par la formule $(valeur_{CTP-VRP} - valeur_{CTP-CCVRP})/valeur_{CTP-VRP}$. Si l'écart est positif, alors la valeur du CTP-CCVRP est plus grande que la valeur de référence (le CTP-VRP). Les temps de transport (et donc les temps d'arrivée) sont arbitrairement calculés en utilisant les distances : on obtient des ordres de grandeurs identiques pour la distance parcourue et la somme

- (3) Demande d'un habitant
- ▲ Habitant
- Zone de couverture d'un point de distribution
- Point de distribution visité
- Point de distribution non visité
- Dépôt
- Une route empruntée par un camion

des temps d'arrivée. Le temps d'arrivée maximal correspond au point de distribution atteint le dernier.

3.3. Unique camion à capacité illimitée

À partir du CTP-VRP, on peut revenir à une solution de CTP au sens de Gendreau et al. en limitant à un seul camion à capacité illimitée. Nous avons illustré cet exemple en figure 2, que l'on peut comparer à la solution du CTP-CCVRP en figure 3.

On obtient un écart de -12.5% (cf. tableau 1) concernant la somme des temps d'arrivée (cf. tableau 1), avec une faible augmentation de la distance de $+6.6\%$. En revanche, le dernier point de distribution desservi attend légèrement plus : c'est le seul exemple qui montre ce cas.

3.4. Deux, trois et quatre camions

Avec deux camions disponibles et une capacité de 18, on remarque que le CTP-CCVRP donne de biens meilleurs résultats que le CTP-VRP (figure 5 et figure 4) en terme de temps d'arrivée (tableau 2).

Le fait de passer à trois camions (figure 7) ne diminue la somme des temps d'arrivée que de 11% , tout en augmentant la distance parcourue de 20% entre les deux solutions du CTP-CCVRP. Sans surprise, les résultats pour deux, trois et quatre camions sont les mêmes pour le CTP-VRP : celui-ci tend toujours à minimiser le nombre de camions, car son objectif est de minimiser la distance.

Le passage de trois à quatre camions (figure 7) confirme le phénomène : pour une toute petite diminution de la somme des temps d'arrivée, on en arrive à augmenter très fortement la distance parcourue (tableau 4).

3.5. Conclusions

Les solutions données par le modèle CTP-CCVRP peuvent être théoriquement intéressantes dans certains cas humanitaires. On remarque cependant que le fait d'ajouter un camion, à partir d'un certain nombre de camions, ne diminuera que peu la somme des temps d'attente, tout en augmentant très significativement la distance parcourue.

Pour que ce modèle puisse être utilisé, il serait d'abord nécessaire de trouver une méthode de résolution approchée (méta-heuristique par exemple) permettant de résoudre des instances de taille réelle. La formulation du problème étant différente de tous les problèmes déjà rencontrés dans la littérature, trouver une méta-heuristique n'est pas évident.

	CTP	CCVRP
Objectif	Minimisation des coûts	Minimisation des temps d'arrivée
Contraintes	Le dernier point de distribution visité impose une discrimination dans l'aide apportée	Nécessite que tous les habitants soient atteignables
Avantages	Permet de prendre en compte des situations où tous les habitants ne sont pas atteignables, ou lorsqu'on ne souhaite visiter qu'un sous-ensemble de points de distribution ; permet de respecter le critère d'équité	Permet de fournir l'aide en respectant le critère d'urgence

FIGURE 1: Tableau comparatif CTP vs. CCVRP

Le fait d'avoir les résultats d'instances réelles permettrait aux organisations humanitaires de savoir si, oui ou non, ces résultats sont cohérents avec la réalité logistique.

Annexes

3.6. Modèle mathématique du CTP-VRP

Nous nous sommes inspirés du problème discuté par Naji-Azimi et al. (2012) pour définir le modèle de référence CTP-VRP permettant d'évaluer les performances du CTP-CCVRP. Le CTP-VRP est défini par un graphe orienté complet $G = (V, A)$ dans lequel V représente l'ensemble des sommets et A l'ensemble des arcs. On définit $V = \{0\} \cup I \cup J \cup \{m+1\}$, 0 étant le dépôt de départ et $\{m+1\}$ le dépôt d'arrivée (il s'agit en réalité du même dépôt), $I = \{1, \dots, n\}$ l'ensemble des habitants et $J = \{n+1, \dots, n+1+m\}$ l'ensemble des points de distribution. On notera aussi $K = \{1, \dots, l\}$ l'ensemble des véhicules. Contrairement au CTP de Gendreau et al. (1997), on ne définit pas de points de distribution que l'on doit visiter obligatoirement : tous les points de distribution sont optionnels. Cependant, tous les habitants I doivent être couverts. L'ensemble des arcs est défini par $A = \{(v_i, v_j) : v_i, v_j \in V\}$, et la matrice de distance c_{ij} est définie sur A . Une flotte de véhicules L est disponible, Q étant la capacité (homogène) de tous les véhicules $k \in K$. Enfin, $\alpha = \{\alpha_{ij} \mid i \in I, j \in J\}$ est une matrice dans laquelle α_{ij} est vrai si l'habitant i est couvert par j avec une distance inférieure à d , et faux sinon. Nous définissons également les variables de décision suivantes :

- D_{ijk} est la quantité de demande de l'habitant i fournie par le $k^{ième}$ véhicule lors de sa visite au point de distribution j ;
- x_{ijk} est vraie si $arc(i, j)$ est utilisé par le véhicule k , et faux sinon ;
- y_{jk} est vraie si le point distribution j est visité par le véhicule k ;
- u_{jk} est une variable de décision libre permettant à la fois de représenter le temps d'arrivée du véhicule k au point de distribution j et d'éliminer les *subtour*.

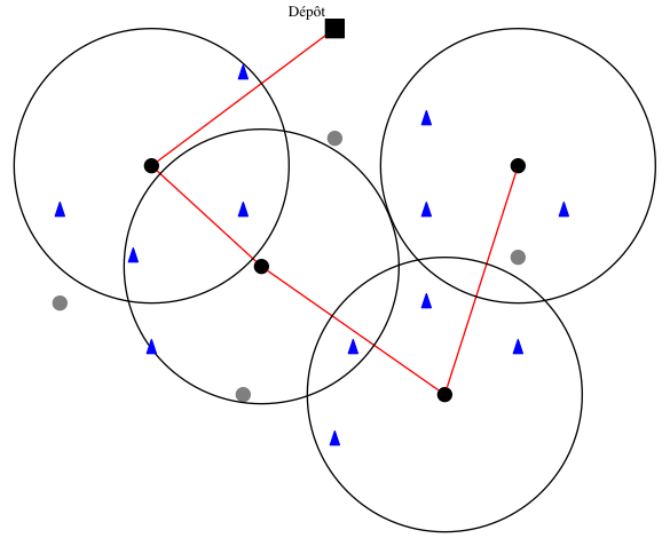


FIGURE 2: Solution du CTP-VRP avec les contraintes du CTP classique. L'arc de retour n'est pas affiché mais fait bien partie du calcul de la fonction objectif.

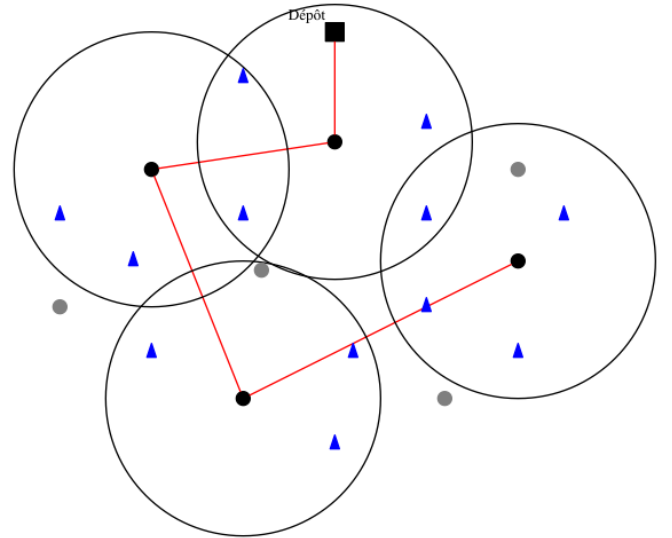


FIGURE 3: Solution du CTP-VRP avec un unique camion disponible et une capacité illimitée.

	CTP-VRP	CTP-CCVRP	Écart
Camions utilisés	1 parmi 1	1 parmi 1	
Distance parcourue	11.69	12.46	+6.6%
Somme temps d'arrivée	22.39	19.59	-12.5%
Temps d'arrivée max.	9.19	9.26	+0.8%

TABLE 1: Comparatif CTP-VRP et CTP-CCVRP avec un unique camions et une capacité illimitée.

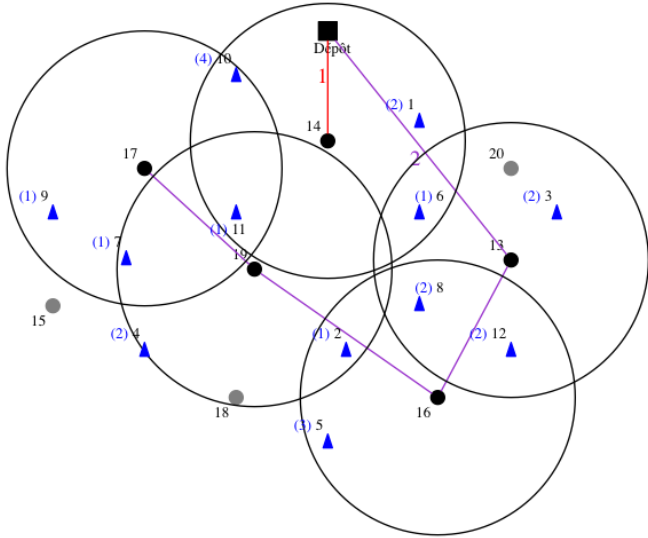


FIGURE 4: Solution du CTP-VRP avec deux camions disponibles.

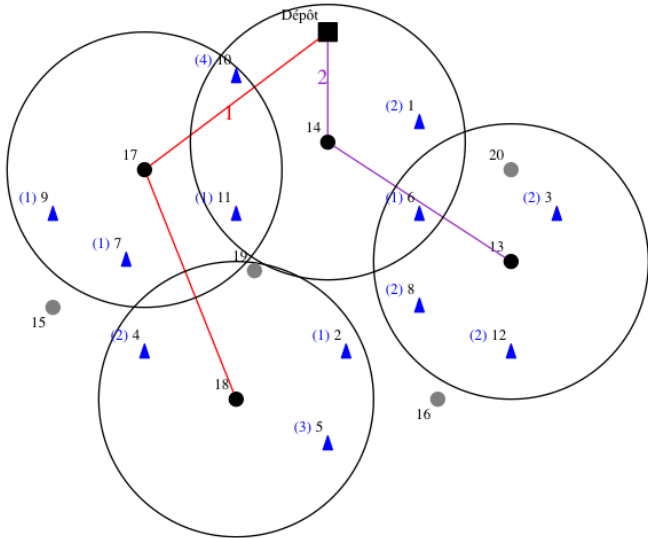


FIGURE 5: Solution du CTP-CCVRP avec deux camions disponibles.

	CTP-VRP	CTP-CCVRP	Écart
Camions utilisés	2 parmi 2	2 parmi 2	
Distance parcourue	13.87	16.1	+16.1%
Somme temps d'arrivée	25.61	12.48	-51.3%
Temps d'arrivée max.	8.97	5.19	-42.1%

TABLE 2: Comparatif CTP-VRP et CTP-CCVRP avec deux camions disponibles et une capacité de 18.

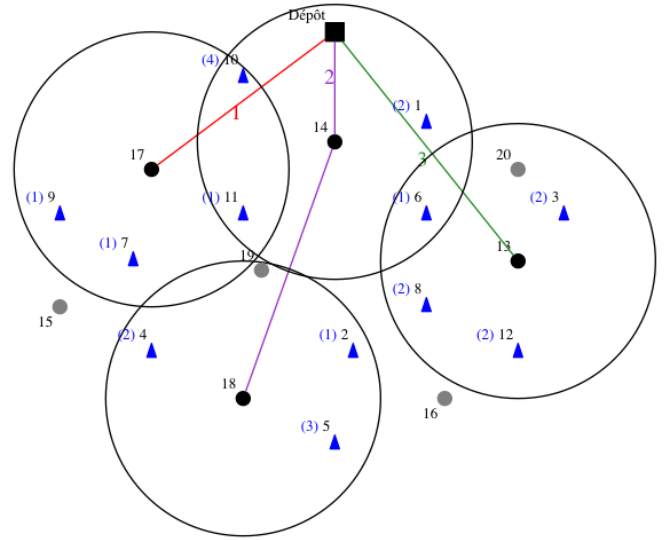


FIGURE 6: Solution du CTP-CCVRP avec trois camions disponibles. Le résultat du CTP-VRP étant le même pour deux, trois et quatre camions, on se référera à figure 4.

	CTP-VRP	CTP-CCVRP	Écart
Camions utilisés	2 parmi 3	3 parmi 3	
Distance parcourue	13.87	19.69	+42.0%
Somme temps d'arrivée	25.61	11.07	-56.8%
Temps d'arrivée max.	8.97	4.17	-53.5%

TABLE 3: Comparatif CTP-VRP et CTP-CCVRP avec trois camions disponibles et une capacité de 18.

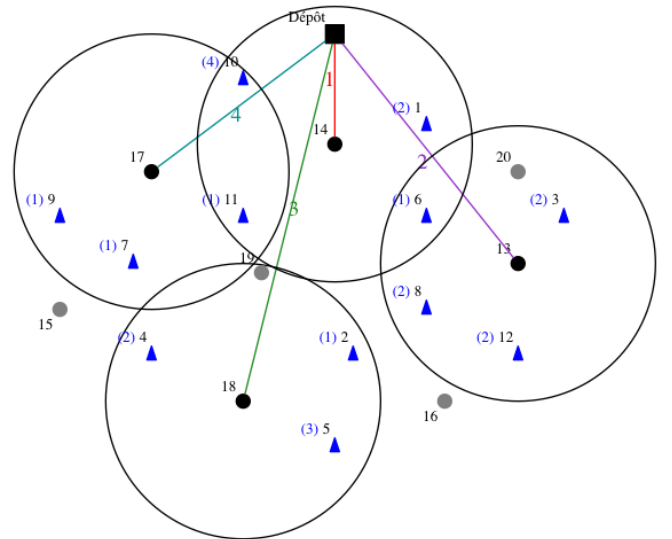


FIGURE 7: Solution du CTP-CCVRP avec quatre camions disponibles. Le résultat du CTP-VRP étant le même pour deux, trois et quatre camions, on se référera à figure 4.

Le modèle est formulé comme suit :

$$\text{Minimiser } \sum_{i=0}^m \sum_{j=1}^{m+1} \sum_{k=1}^l c_{ij} x_{ijk} \quad (1)$$

sous les contraintes :

$$\sum_{i=0}^m x_{ijk} = y_{jk} \quad \forall j \in \{0\} \cup J, k \in K \quad (2)$$

$$\sum_{i=0}^{n+1+m} x_{jik} = y_{jk} \quad \forall j \in J \cup \{m+1\}, k \in K \quad (3)$$

$$\sum_{j=0}^m x_{0jk} = 1 \quad \forall k \in K \quad (4)$$

$$\sum_{j=1}^{n+1+m} x_{j0k} = 1 \quad \forall k \in K \quad (5)$$

$$\sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^l \alpha_{ij} D_{ijk} \geq d_i \quad \forall i \in I \quad (6)$$

$$\sum_{i=1}^n D_{ijk} \leq Q_k y_{jk} \quad \forall k \in K, j \in J \quad (7)$$

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m D_{ijk} \leq Q_k \quad \forall k \in K \quad (8)$$

$$u_{ik} + c_{ij} - (1 - x_{ijk})T \leq u_{jk} \quad \forall i \in \{0\} \cup J, j \in J \cup \{0, n+1+m\}, k \in K \quad (9)$$

$$x_{ijk} \in \{0, 1\} \quad \forall i, j \in \{0\} \cup J \cup \{n+m+1\}, i \neq j, k \in K \quad (10)$$

$$y_{jk} \in \{0, 1\} \quad \forall j \in J, k \in K \quad (11)$$

$$u_{ik} \geq 0 \quad \forall i \in J, k \in K \quad (12)$$

$$D_{ijk} \geq 0 \quad \forall i \in I, j \in J, k \in K \quad (13)$$

$$T \geq 0 \quad (14)$$

La fonction objectif 1 minimise la distance totale parcourue par les camions. Les contraintes 2 et 3 assurent que, pour chaque point de distribution j et pour chaque véhicule k , il y a à la fois autant d'arcs entrants que d'arcs sortants de j . Les contraintes 4 et 5 contraignent l'existence d'un seul arc sortant du dépôt et un seul arc entrant au dépôt pour chaque véhicule k . La contrainte 6 spécifie qu'un habitant i peut être approvisionné par plusieurs point de distribution j (« distribution mutualisée »). La contrainte 7 relie les variables de décision D_{ijk} à l'utilisation de chaque véhicule k pour une livraison au point de demande j . La contrainte 8 impose le respect de la capacité Q pour chaque véhicule k . La contrainte 9, tirée de Ngueveu et al. (2010), permet à la fois l'élimination des *sub-tours* et le calcul des temps d'arrivée des camions aux points de distribution. T est une constante arbitrairement grande.

3.7. Modèle mathématique du CTP-CCVRP

Le modèle CTP-CCVRP que nous proposons à partir du modèle du CTP-VRP ne nécessite que de changer la fonction objectif équation (1). Au lieu d'une minimisation des distances, on minimise la somme des temps d'arrivée aux points de distribution, c'est à dire la somme des u_{jk} . Ainsi, voici la nouvelle fonction objectif :

$$\text{Minimiser } \sum_{j \in J, k \in L} u_{jk} \quad (15)$$

Références

- Campbell, A. M., Vandebussche, D., Hermann, W., Mar. 2008. Routing for Relief Efforts. *Transportation Science* 42 (2), 127–145. URL <http://pubsonline.informs.org/doi/abs/10.1287/trsc.1070.0209>
- Gendreau, M., Laporte, G., Semet, F., Aug. 1997. The Covering Tour Problem. *Operations Research* 45 (4), 568–576. URL <http://pubsonline.informs.org/doi/abs/10.1287/opre.45.4.568>
- Hachicha, M., John Hodgson, M., Laporte, G., Semet, F., Jan. 2000. Heuristics for the multi-vehicle covering tour problem. *Computers & Operations Research* 27 (1), 29–42. URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0305054899000064>
- Hodgson, M. J., Laporte, G., Semet, F., Nov. 1998. A Covering Tour Model for Planning Mobile Health Care Facilities in Suhum District, Ghama. *Journal of Regional Science* 38 (4), 621–638. URL <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/0022-4146.00113/abstract>
- Jozefowicz, N., Semet, F., Talbi, E.-G., Jul. 2007. The bi-objective covering tour problem. *Computers & Operations Research* 34 (7), 1929–1942. URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0305054805002480>
- Naji-Azimi, Z., Renaud, J., Ruiz, A., Salari, M., Nov. 2012. A covering tour approach to the location of satellite distribution centers to supply humanitarian aid. *European Journal of Operational Research* 222 (3), 596–605. URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0377221712003475>
- Ngueveu, S. U., Prins, C., Wolfier Calvo, R., Nov. 2010. An effective memetic algorithm for the cumulative capacitated vehicle routing problem. *Computers & Operations Research* 37 (11), 1877–1885. URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0305054809001725>

	CTP-VRP	CTP-CCVRP	Écart
Camions utilisés	2 parmi 4	4 parmi 4	
Distance parcourue	13.87	22.04	+58.9%
Somme temps d'arrivée	25.61	11.02	-57.0%
Temps d'arrivée max.	8.97	4.12	-54.1%

TABLE 4: Comparatif CTP-VRP et CTP-CCVRP avec quatre camions disponibles et une capacité de 18.