

## Rapport d'évaluation du mémoire de thèse / Evaluation report of the PhD thesis

<b>Doctorant</b>	Nom prénom / Full name	DUCOMMAN
<b>PhD student</b>	Ecole Doctorale / Doctoral School	SYLVAIN
	Titre thèse / PhD Title	Optimisation de tournées de véhicules par programmation par contraintes : conception et développement d'un solveur industriel
<b>Rapporteur</b>	Nom prénom / Full name	PRINS CHRISTIAN
<b>Reviewer</b>	Etablissement / Institution	Université de Technologie de Troyes (UTT)
	Statut, fonction / Status, position	Professeur des Universités (PRCE1)

### Qualité du mémoire, rédaction & illustrations / Thesis quality, style & illustrations

 Satisfaisant / Satisfactory ☐ Bon / Good ☐ Très bon / Very good ☒ Exceptionnel ☐

#### Commentaires/comments :

Mémoire clair, bien écrit et bien structuré.

### Contexte, état de l'art, collaborations / Background, state of the art, collaborations :

#### Commentaires/comments :

Thèse en convention CIFRE avec l'entreprise GEOCONCEPT, pour la réalisation d'un moteur de calcul pour l'optimisation des tournées de véhicules. Ce moteur basé sur les techniques de programmation par contraintes doit permettre de gérer de nombreuses contraintes réelles. L'état de l'art est OK.

### Qualité scientifique, méthodologie, expérimentations, validation

#### Scientific quality, methodology, experiments, validation

 Satisfaisant / Satisfactory ☐ Bon / Good ☐ Très bon / Very good ☒ Exceptionnel ☐

#### Commentaires/comments :

La qualité scientifique est très bonne. Les problèmes sont bien analysés et modélisés, de plusieurs manières qui sont ensuite évaluées sur des jeux d'essai et comparées. Le moteur de calcul se révèle plus rapide que le logiciel existant de l'entreprise et donne de meilleurs résultats.

### Apports personnels, originalité, valorisation, perspectives

#### Personal contributions, originality, valorization, prospects

#### Commentaires/comments :

Les méthodes d'optimisation de tournées de véhicules sont essentiellement des métaheuristiques à base de recherches locales. La programmation par contraintes (PPC) est parfois utilisée, mais pour renforcer les méthodes. Ici, le développement d'un moteur de calcul entièrement basé sur la PPC est original. Ce moteur devrait être intégré dans le futur logiciel de tournées de la société GEOCONCEPT.

---

**Conclusions du rapporteur / Reviewer's conclusions**

*Commentaires/comments :*

**Thèse de très bonne qualité qui débouche sur du concret et qui mérite d'être soutenue.**

**Avis du rapporteur / Reviewer's opinion :**

Défavorable à la soutenance / Unfavorable to the defence ☐

Favorable ☒

Date

16/04/2017

Signature



**Visa du directeur de l'école doctorale :**

## Rapport sur la thèse de M. Sylvain DUCOMMAN

### "Optimisation de tournées de véhicules par programmation par contraintes : conception et développement d'un solveur industriel"

Les problèmes de tournées de véhicules sont des problèmes d'optimisation combinatoires difficiles avec d'importantes applications en logistique. Comme les contraintes à satisfaire sont très variables selon les entreprises, il est important de disposer d'algorithmes génériques. Cette thèse réalisée en convention CIFRE avec l'entreprise GEOCONCEPT vise justement à développer un nouveau moteur de calcul flexible basé sur la programmation par contraintes (PPC), pour remplacer son logiciel existant TourSolver. La thèse de 157 pages comprend une introduction, six chapitres, une conclusion, six annexes avec des résultats détaillés, et une bibliographie.

Le chapitre 1 présente l'entreprise, le type de problèmes de tournées à résoudre, un modèle sous forme de graphe unifié pour représenter les problèmes des utilisateurs, et l'architecture générale du logiciel proposé. Le problème, détaillé dans l'annexe A, est très riche, avec de nombreuses contraintes réelles : véhicules hétérogènes, fenêtres de temps dures et souples, législation sur le temps de conduite, etc. Sa résolution constitue donc un défi de taille.

Le chapitre 2 rappelle clairement des concepts de base sur la programmation linéaire, le problème du voyageur de commerce (TSP), le problème de tournées avec contraintes de capacité des véhicules (CVRP), et la PPC. Pour les deux problèmes de tournées sont discutés les bornes inférieures et algorithmes disponibles ainsi que le cas des fenêtres horaires. Bien que la littérature sur le CVRP soit très vaste, le livre de synthèse très complet de Toth et Vigo (SIAM, 2014) et la meilleure méthode exacte actuelle (Pecin, Pessoa, Poggi, Uchoa, 2014, 200 clients) auraient mérité une citation.

Le chapitre 3 présente une étude théorique comparant les bornes classiques pour le TSP : relaxations de Held et Karp (HK) et du problème d'affectation, et  $n$ -paths avec et sans 1-circuits. Chaque borne peut être assez loin de l'optimum, comme montré sur des exemples, et en général elles ne sont pas comparables. Ce chapitre intéressant appelle 3 remarques. Premièrement, les graphes-exemples considérés sont non complets alors que le TSP est défini dans la littérature sur un graphe complet. La raison est que l'existence d'un cycle hamiltonien est déjà un problème NP-complet sur un graphe quelconque. Les calculs de 1-arbres ou affectations devraient donc se faire sur le graphe réduit, dans lequel chaque arête représente un chemin de coût minimal dans le graphe initial. Les cas pathologiques observés seraient alors peut-être différents. Deuxièmement, si j'ai bien compris, les remarques sur HK concernent le calcul d'un 1-arbre avec des valeurs fixées des multiplicateurs de Lagrange, sans la méthode de sous-gradient qui doit suivre. Cela ne rend pas honneur à cette excellente borne qui est asymptotiquement optimale sur des grands TSP euclidiens (Valenzuela et Jones, EJOR, 1997). Enfin, on aurait sans doute de meilleures bornes en générant des coupes classiques sur le programme linéaire relaxé, comme dans les méthodes de branch-and-cut mais sans effectuer de séparation. L'inconvénient est l'ajout d'un solveur de programmation linéaire si on veut ce genre de borne dans le logiciel.

Différents modèles de PPC sont proposés dans le chapitre 4 pour le TSP sans et avec fenêtres de temps. En particulier, la contrainte CIRCUIT pour que les tournées soient des cycles élémentaires est remplacée par WEIGHTEDCIRCUIT qui a l'avantage de fournir une borne inférieure. Le candidat décrit divers filtrages, des tests d'identification des arêtes obligatoires ou interdites, et des stratégies de

branchement. Les tests numériques sur des TSP et TSPTW ayant jusqu'à 100 nœuds combinent les différents modèles, les relaxations utilisées dans WEIGHTEDCIRCUIT et les stratégies de branchement. Ils montrent notamment les bonnes performances du modèle  $MO_{31}$  à variables positionnelles.

Le chapitre 5 continue d'appliquer la PPC mais au CVRP à fenêtres de temps (CVRPTW). En concaténant les listes de clients des tournées (modélisation dite "chromosomique") on peut se ramener au TSP avec fenêtre de temps (TSPTW) et donc appliquer la contrainte WEIGHTEDCIRCUIT. Les tests sur les instances classiques de Solomon (1987) à 25, 50 et 100 nœuds montrent des performances prometteuses : en une dizaine de minutes, la preuve d'optimalité est obtenue sur beaucoup d'instances à 25 nœuds et même sur certaines à 100 nœuds. Même si le solveur est encore en développement, une comparaison avec une métaheuristique de référence de la littérature aurait été cependant bienvenue. La construction d'instances très dures en termes de fenêtres horaires ou de bin-packing serait aussi intéressante, pour montrer l'avantage de la PPC pour trouver des solutions réalisables, par rapport à des métaheuristiques basées sur la recherche locale.

Etant spécialiste en problèmes de tournées de véhicules mais pas en PPC, j'aurais aimé dans les chapitres 4 et 5 quelques détails sur OtSolver, en particulier quelles contraintes classiques sont fournies et quelles contraintes ont dû être implémentées.

Le chapitre 6 présente les premiers tests du solveur obtenu, OtSolver, sur des données industrielles et des comparaisons avec le solveur existant TourSolver. Les tests vont de 65 à 1291 clients. En 10 minutes maximum, des solutions avec un écart aux bornes inférieures entre 4 et 13% sont atteintes. Le nouveau moteur surpasse TourSolver aussi bien en termes de qualité des solutions que de temps de calcul, il est même 8 fois plus rapide sur une instance.

La conclusion résume les contributions sur le solveur, encore en développement. Elle pourrait indiquer plus de perspectives car la conception de tels solveurs soulève encore de nombreux challenges.

En résumé, cette thèse claire, pragmatique et bien écrite montre bien l'intérêt de combiner des techniques de programmation par contraintes et de recherche opérationnelle pour vaincre des problèmes difficiles de tournées de véhicules. Contrairement à nombre de thèses académiques, le travail débouche sur du concret utilisable : un solveur aux résultats prometteurs, qui sera inclus dans un logiciel commercial pour l'optimisation de tournées de véhicules. Il reste évidemment des contraintes réelles à inclure, en particulier je m'interroge sur la gestion des fenêtres de temps multiples ou souples et des véhicules hétérogènes dans les modèles de PPC proposés. Côté informatique, le candidat a certainement fait un travail d'implémentation informatique considérable qui pourrait être mieux mis en avant. Le travail a déjà donné lieu à deux conférences et il mériterait un article en revue si la confidentialité le permet. Le bilan me paraît donc vraiment très bon et je recommande sans hésitation la soutenance.

Fait à Troyes le 16 avril 2017



Prof. Christian Prins |

