

Master informatique
parcours "Optimisation en Recherche Opérationnelle"

Travaux pratiques
"Optimisation discrète et combinatoire"

Optimisation d'un système de livraison de proximité automatisé

Prof. Xavier Gandibleux

Novembre 2019

1 Blade Flyer III : in the air, on the road

1.1 Genèse du sujet

"BladeFlyer"¹ est un système logistique de proximité imaginé en 2014 par Xavier Gandibleux ; il a fait l'objet du stage de licence de Lenny Lucas et de Alexis Ruchaud en 2014 (alors étudiants en licence 3 informatique), ainsi que l'objet du TER de Antoine Marendet en 2015 (alors étudiant en master 1 informatique parcours "Optimisation en Recherche Opérationnelle"). L'idée originale de "BladeFlyer" est de combiner un réseau de transport public et la technologie des drones aériens alors en émergence dans les usages civils, afin d'assurer la livraison de petits colis au niveau de l'espace urbain et périurbain d'une métropole. Les données issues de l'Open Data disponibles sur Nantes ont permis de valider un démonstrateur logiciel. Cependant, faute de moyens et de soutiens, il n'a pas été possible de mobiliser des ressources humaines et financières, et donc de poursuivre ces travaux de recherche. Toutefois, la littérature scientifique apparue à partir de 2015 [8], notamment dans des revues scientifiques prestigieuses nord américaines (voir par exemple [1, 8, 9]), montre la pertinence du concept en plébiscitant cette idée de combiner le transport routier avec des drones aériens. Ainsi le TSP-D [1], une nouvelle classe d'optimisation dérivée du problème de voyageur de commerce a été introduite. Dans le cadre du TER de Pauline Chatelier-Bertin en 2017 (alors étudiante en master 1 informatique parcours "Optimisation en Recherche Opérationnelle") mené sous la direction scientifique de Xavier Gandibleux, nous nous sommes intéressés à un système logistique de proximité terrestre et automatisé, mariant notamment des technologies numériques et des droïdes terrestres. Faute de disposer de l'ensemble du matériel pour travailler et des autorisations nécessaires pour mener les expérimentations visées, les travaux ont du prendre une orientation différente. Aujourd'hui, fort des progrès actuels sur les véhicules autonomes et de l'engouement de l'intelligence artificielle, le présent travail revient sur un nouvel opus de Blade Flyer, en proposant un service "B2C" (Business to Customer) de livraison totalement automatisé en environnement urbain, combinant le drone terrestre et aérien : Blade Flyer III.

1.2 Contexte scientifique du sujet

On constate une demande de plus en plus forte de livraisons à domicile et de l'e-commerce pour les biens de consommation courante. Cette tendance est notamment liée au vieillissement de la population, à la diminution du taux de motorisation en centre-ville, à un intérêt pour l'achat ludique ou une valeur du temps en augmentation [10]. Cette tendance est d'autant plus vraie en milieu urbain. Envisager apporter des éléments de réponse à ce constat amène le scientifique à l'intersection de trois problématiques de l'optimisation : la logistique urbaine, la logistique du dernier kilomètre, et le transport à la demande.

La logistique urbaine recouvre l'ensemble des activités inhérentes au transport de marchandises en ville. Elle est comprise comme *une optimisation des opérations liées au transport de marchandises en ville qui nécessite l'introduction de nouveaux métiers de la logistique tout en aidant à l'amélioration du fonctionnement des centres urbains* [2]. Le transport dans un milieu dense et encombré, et l'impact sur la qualité de l'air sont deux aspects clef ici.

1. Le nom BladeFlyer fut inspiré du film "Blade Runner" (1982, Ridley Scott) qui, dans une ambiance cyberpunk, met en scène des androïdes créés à l'image de l'homme.

La logistique du dernier kilomètre décrit le *dernier chaînon de la chaîne de livraison qui s'arrête chez le client final*. Il demeure le plus problématique à gérer d'un point de vue logistique, compte tenu du nombre et de l'éparpillement de ces points de livraison pour la plupart des marchés grand public (voir [4] pour une étude fouillée sur le sujet). L'optimisation des coûts et optimiser la satisfaction du client sont deux valeurs prédominantes ici.

Le transport à la demande est surtout utilisé pour désigner un système de transport de personne. Mais en toute généralité, il désigne *un service de transport ne fonctionnant que sur appel préalable d'un ou plusieurs clients* [3]. Dans notre cas, il sera exclusivement compris dans le sens de livraison à la demande. Le respect d'une consigne horaire et le confort du client sont centraux ici.

La livraison d'un particulier sur le dernier kilomètre reste très coûteuse et chronophage à produire pour un transporteur. Dans le même temps, les clients sont de plus en plus exigeants, et veulent toujours plus de rapidité, plus de service et à moindre coût. Le modèle économique du dernier kilomètre est sensible. Il faut réussir à appréhender le défi logistique sous le bon angle, sous peine de dégager des marges très faibles voir même aucune [7]. La réussite repose sur la maîtrise de l'information, la technologie et les analyses d'optimisation.

1.3 Contexte technologique du sujet

Le recours accru à l'automatisation grâce aux innovations technologiques est un levier prospectif de la livraison sur le dernier kilomètre. On parle donc d'optimisation numérique et organisationnelle. L'avancée technologique des systèmes autonomes et des systèmes numériques ouvre des perspectives de nouveaux modèles logistiques sur le dernier kilomètre.

1.3.1 Vu du côté du livreur

Retirer l'humain de l'équation du dernier km est aujourd'hui une réalité envisageable. Des tentatives avec des systèmes automatisés sont expérimentées.

Les drones aériens livreurs (figure 1) ont été la première technologie des systèmes de livraison automatisés, notamment avec Amazon. Un essai en grandeur réelle de livraison par drone a été réalisé en décembre 2016 en Angleterre avec le service "Amazon Prime Air".



FIGURE 1 – Drone livreur développé par Amazon

Des drones terrestres livreurs (figure 2) sont testés notamment par « Starship Technologies » [11] dans les villes de Redwood en Californie et Washington DC pour les livraisons de moins d'un mile. Il a également été expérimenté dans Londres en 2017 [5].

Ces droïdes alimentés par batterie peuvent transporter des objets à une vitesse d'environ 6,4 kilomètres/heure dans un rayon d'environ 5 km autour des magasins ou des hubs de livraison. Une camionnette a été notamment aménagée comme hub mobile de livraison (figure 3) afin de sortir des périmètres des magasins. Un client peut suivre les progrès du droïde via une application sur smartphone. Chaque droïde est équipé d'un GPS et de neuf caméras qui l'aident à planifier son déplacement. Des capteurs lui permettent d'éviter les obstacles, de détecter le trafic autour de

lui et de naviguer autour des piétons. Il peut monter des bordures jusqu'à 20 cm de hauteur et fonctionne également dans la neige jusqu'à 20 cm de profondeur.

Dans le prolongement de cette technologie, et avec les progrès enregistrés sur les véhicules autonomes, on peut raisonnablement imaginer une solution de type "coffre-fort" telle qu'elle existe déjà de manière fixe (dans des gares, bureau de poste ou station service, etc.) de manière mobile (figure 4) [6].



FIGURE 2 – Robot livreur développé par Starship



FIGURE 3 – Camionnette œuvrant comme hub mobile pour les robots Starship

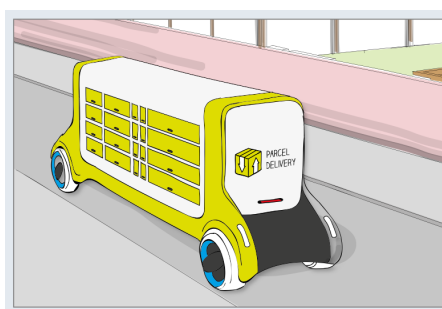


FIGURE 4 – Concept de point de retrait mobile type véhicule autonome avec coffres-fort

1.3.2 Vu du côté du client

L'optimisation des tournées change radicalement et voit apparaître des itinéraires par un routing «live». Le smartphone est devenu la pierre angulaire de la relation avec le fournisseur. Maintenant le destinataire veut voir en direct où se trouve son colis via son coursier. Il veut aussi pouvoir faire le choix de se faire livrer sur un lieu physique convenu ou non, simplement où il se trouve à l'instant.

2 Sujet

Votre mission est de mettre en place un algorithme traitant le TSP-D, reposant sur un drone terrestre et d'un drone aérien. Le lieu de départ et d'arrivée de la tournée sont connus et confondus (un unique dépôt) et les lieux correspondants aux clients à visiter sont connus. Seule l'activité "livraison d'un colis (delivery)" chez les clients par un drone (terrestre ou aérien) est envisagée, et tous les clients doivent être livrés. Un drone aérien ne peut transporter d'un seul colis à la fois. Le drone aérien entre en opération sur un lieu correspondant à un client (ou le dépôt) et rejoint le drone terrestre également sur un lieu correspondant à un client (ou le dépôt). Lorsque les deux drones se rejoignent, il n'est pas nécessaire qu'ils se retrouvent au lieu correspondant à un client au même instant. Il peut donc y avoir une attente de l'un des drones, de l'arrivée de l'autre drone. Pendant que le drone aérien est en opération, le drone terrestre livre un ou plusieurs clients (par simplicité, le cas où le drone terrestre reste au même lieu alors que le drone aérien est en opération n'est pas considéré en première approche). Les deux drones sont disponibles au lieu de départ. La tournée sera considérée terminée dès lors que les deux drones auront rejoint le lieu d'arrivée. L'objectif recherché est d'utiliser au mieux les deux drones de manière à établir une tournée de durée minimale.

2.1 Préparation du travail (distantiel)

- visionner la vidéo de Murray et al. : <https://www.chasemurray.com/research/180-2/> ;
- lire l'article de Poikonen et al. [9] disponible sur madoc ;
- lire l'article de Agatz et al. [1] disponible sur madoc ;
- assimiler le branch-&-bound dans sa version de base qui est proposé dans [9] pour traiter le TSP-D ;

2.2 Travail

- mettre en place votre algorithme de branch-and-bound pour le TSP-D ;
- évaluer votre algorithme sur les instances disponibles à l'url suivante : http://www.stefan-poikonen.net/tspd_instance_data.zip ;
- mettre en place un aspect proposé en supplément pris dans la liste suggérée ;
- produire un rapport qui présente succinctement le problème traité, les algorithmes mis en place, le supplément traité, les résultats obtenus, une conclusion ;

2.3 Suppléments proposés

- mettre en oeuvre une résolution exacte avec JuMP d'un modèle ILP pour le TSP-D proposé dans la littérature ; expliquer le modèle, expérimenter le modèle sous JuMP en utilisant un solveur exact (GLPK ou GUROBI ou CPLEX), rapporter votre expérimentation numérique comparativement à votre algorithme de branch-and-bound pour le TSP-D ;
- considérer la variante du problème qui considère que le drone terrestre peut rester en attente sur un point durant toute la durée d'une opération du drone aérien ; rapporter votre expérimentation numérique pour cette variante comparativement à votre algorithme de branch-and-bound pour le TSP-D sans celle-ci ;
- mettre en oeuvre un composant supplémentaire parmi les composants proposés dans l'article de Poikonen et al. [9] ; rapporter votre expérimentation numérique pour cette variante comparativement à votre algorithme de branch-and-bound pour le TSP-D sans celle-ci ;

2.4 Calendrier du travail

- 12h TP en présentiel sont réservées à la réalisation du travail ;
- avant la première séance de TP, prendre connaissance du sujet et réaliser le distantiel ;
- semaine 46/12 novembre : mettre en place l'algorithme calculant une solution optimale de TSP ;
- semaine 47/19 novembre : mettre en place l'algorithme de branch-&-bound pour le TSP-D ;
- semaine 48/26 novembre : mettre en place le point en supplément choisi ;
- semaine 49/03 décembre : finaliser l'expérimentation numérique et le rapport ;
- déposer sur madoc avant le 11 décembre minuit l'ensemble de votre production (code, rapport).

2.5 Consignes de travail

- le travail est à réaliser seul ;
- l'usage de votre ordinateur personnel est encouragé ;
- les implémentations se feront en Julia dans un environnement linux
- si nécessaire, le recours à JuMP est autorisé ;
- l'évaluation finale se fera sur un ordinateur de la salle info2 ;
- le rapport est à produire en \LaTeX ;

2.6 Approches pour résoudre le TSP

- modéliser sous JuMP le LAP correspondant à la relaxation combinatoire du TSP, résoudre le LAP, éliminer les éventuels sous-tours en ajoutant itérativement une contrainte d'élimination de sous-tour jusqu'à obtenir une solution optimale admissible pour le TSP ;
- mettre en oeuvre l'algorithme de branch-and-bound étudié qui repose et exploite le LAP résolu par l'algorithme hongrois ;
- mettre en oeuvre un algorithme de branch-and-bound de la littérature qui repose et exploite le LAP ;

Références

- [1] Niels Agatz, Paul Bouman, and Marie Schmidt. Optimization approaches for the traveling salesman problem with drone. *Transportation Science*, 52(4) :965–981, 2018.
- [2] Virginie Augereau. *Du transport de marchandises en ville à la logistique urbaine, quels rôles pour un opérateur de transports publics urbains ? L'exemple de la RATP*. Thèse, Université Paris-Est, septembre 2009.
- [3] Elodie Castex. *Le transport à la demande (TAD) en France : de l'état des lieux à l'anticipation. Modélisation des caractéristiques fonctionnelles des TAD pour développer les modes flexibles de demain*. Thèse, Université d'Avignon, novembre 2007.
- [4] Raphaëlle Ducret. *Nouvelles organisations de la distribution urbaine des colis sur le dernier kilomètre : innover par une approche spatiale*. Thèse, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris, décembre 2014.
- [5] Voxlog (Sélène Jeusset). *Tesco teste la livraison à domicile avec un robot de Starship Technologies* (<http://www.voxlog.fr/actualite/2055/tesco-teste-la-livraison-a-domicile-avec-un-robot-de-starship-technologies>), 2017.
- [6] Florian Neuhaus Christoph Klink Florian Mann) McKinsey& Company (Martin Joeress, Jürgen Schröder. *Parcel delivery The future of last mile* (https://www.mckinsey.com/~media/mckinsey/industries/travel%20transport%20and%20logistics/our%20insights/how%20customer%20demands%20are%20reshaping%20last%20mile%20delivery/parcel_delivery_the_future_of_last_mile.ashx), 2016.
- [7] BUSINESS | STRATÉGIE | CONSEILS (Bruno Sanlaville). *Les enjeux de la livraison instantanée du dernier kilomètre* (<http://www.bs-conseils.fr/index.php/2017/09/26/les-enjeux-de-la-livraison-instantanee-du-dernier-kilometre/>), 2017.
- [8] Chase C. Murray and Amanda G. Chu. The flying sidekick traveling salesman problem : Optimization of drone-assisted parcel delivery. *Transportation Research Part C : Emerging Technologies*, 54 :86 – 109, 2015.
- [9] Stefan Poikonen, Bruce Golden, and Edward A. Wasil. A branch-and-bound approach to the traveling salesman problem with a drone. *INFORMS Journal on Computing*, 31(2) :335–346, 2019.
- [10] RetailChain. *La logistique urbaine* (<https://retail-chain.fr/logistique-urbaine>), 2018.
- [11] Starship Technologies. *Robot Starship* (<https://www.starship.xyz/>), 2018.