

ÉTUDE ET RÉOLUTION DU PROBLÈME DE TRANSPORT À LA DEMANDE AVEC QUALITÉ DE SERVICE

par Thierry Garaix

Politecnico di Torino

24 corso Duca Degli Abruzzi 10100 TURIN, Italie

E-mail : thierry.garaix@polito.it

Dans cette thèse dirigée par Joël Charre (UMR Espace, Avignon) et Christian Artigues (LAAS, Toulouse) et soutenue à l'Université d'Avignon le 13 décembre 2007, nous étudions un problème de construction de tournées de véhicules pour le transport de personnes à la demande (TAD), qui, combinant la souplesse des taxis à la capacité de regroupement des transports en commun, permet de repenser nos pratiques en terme de mobilité. Après avoir défini puis classé plusieurs critères de qualité de service, nous en sélectionnons trois pour leur représentativité : la minimisation de la distance totale parcourue, la maximisation du taux de remplissage des véhicules et la minimisation du temps perdu en transport. La méthode d'optimisation utilisée est basée sur une approche par décomposition appelée génération de colonnes. Nous nous plaçons dans le cas statique où toutes les demandes sont connues par avance. L'adaptation de cette méthode exacte aux trois critères choisis induit des développements originaux, comme la modélisation du réseau par un p-graphe ou l'optimisation d'une fonction objectif fractionnaire. Cette étude est intégrée dans un projet pluridisciplinaire piloté par des géographes, qui a pour sujet d'expérimentation la mise en place d'un TAD opérationnel dans le pays du Doubs central (France). Un algorithme de résolution heuristique spécifique a été développé pour cette application. L'intégration des résultats des deux algorithmes à un système d'information géographique permet une analyse des critères de qualité de service et de leurs interactions avec le territoire d'un point de vue géomatique. Il en découle une étude sur la forme des tournées et plus particulièrement sur différentes mesures de leur sinuosité.

In this thesis, we address vehicle routing problems deriving from on-demand transport systems (ODT). Such systems, combining taxi flexibility with public transport system advantages (grouping, price), seem well suited to the new mobility needs. We define and classify a large set of quality of service criteria. We select three of them among the most representative: the total distance travelled, the vehicle occupancy rate and the passenger wasted-time. We propose branch-and-price solution schemes for the three cases, under the assumption that demands are known in advance. The original quality of service objectives introduces non-standard features into the vehicle routing model, namely a multigraph and a fractional objective function, therefore inducing non-standard algorithms. This work is part of a multidisciplinary project managed by geographers. The implementation of an operational ODT in the Doubs central area (France) is used as a testing ground for experimentations. For the practical use of this system, we propose an insertion heuristic in addition to the branch-and-price algorithm. A geomatic analysis of the interactions between quality of service criteria and the geographical area is carried out with a Geographic Information System, with a special focus on route shapes and route sinuosity measures.

1 Introduction aux transports à la demande (TAD)

1.1 Évolution des besoins en transport

Les individus recherchent des services de transport toujours plus souples, plus proches de leurs besoins. Malgré de récents efforts, les transports

publics ne répondent que partiellement à ces attentes. Si ceux-ci restent compétitifs sur certains segments, dans la majorité des cas la voiture personnelle reste la plus à même de répondre aux besoins de déplacements individuels (Wiel 2002). Toutefois, sur les segments où les véhicules privés sont les plus compétitifs (zones péri-urbaines, rurales...), de par leur disponibilité et leur efficacité,

des solutions alternatives existent (Castex et Josselin 2007). Relativement mal connus du grand public et plutôt négligés par les transporteurs, les transports à la demande (TAD), datant des années 1970, font leur réapparition depuis la fin des années 1990, à la faveur de l'avènement de nouvelles technologies de l'information et de la communication (Ambrosino et Nelson 2004) et de volontés politiques. Les TAD peuvent se définir comme : des « transports terrestres collectifs individualisés de personnes, activés seulement à la demande ». La figure 1 illustre le principe de fonctionnement d'un TAD. Elle représente les requêtes (flèches), les temps de trajet (pondération des flèches) estimés de l'origine (cercle surmonté de personnages) vers la destination. L'heure d'arrivée souhaitée est indiquée à côté de la destination. Les cercles accolés à un véhicule représentent les dépôts des véhicules. L'itinéraire de chaque véhicule est représenté en pointillés. L'heure de passage est indiquée pour chaque lieu (ramassage ou livraison).

1.2 Thèmes de recherche liés aux TAD

De nombreuses disciplines s'intéressent aux TAD. Les sociologues s'interrogent sur les causes et conséquences pour notre société d'une mobilité plus intensive et plus flexible (Bailly et Heurgon 2001). Des géographes étudient l'interaction entre les réseaux de communication (transport ou autre) et les territoires pour savoir dans quelle mesure les territoires forment les réseaux ou à quel niveau les réseaux (dé)structurent les territoires (Castex et Josselin 2007). Les applications de tels transports, notamment en temps réel, ouvrent le champ aux nouvelles technologies de télécommunication (GPS, Wi-Fi, Bluetooth...). Enfin, les TAD présentent de nouveaux problèmes d'optimisation combinatoire à la communauté de la recherche opérationnelle. L'optimisation de tels systèmes de transport intervient au niveau de la conception du système (localisation des dépôts, caractéristiques de la flotte de véhicules, types de réservation...), au niveau de sa gestion quotidienne (calcul des tournées, emploi du temps des chauffeurs...) et au niveau de son suivi (audit et retour sur expérience). Le traité IGAT rédigé sous la direction de G. Finke (Finke 2002) fournit un aperçu de ces différents aspects.

1.3 Positionnement et plan de la thèse

Dans cette thèse, nous nous intéressons au transport collectif individualisé correspondant aux exigences modernes et plus particulièrement au calcul et à l'optimisation des itinéraires via différents critères de qualité de service, à l'aide de méthodes adaptées provenant de la recherche opérationnelle.

Les critères et les techniques d'optimisation ainsi que les outils proposés dépendent des préoccupations appartenant au champ de la géographie. En amont du calcul des tournées des véhicules, nous définissons des critères d'optimisation tenant compte du territoire et de sa population. Ces critères sont présentés dans la section 2. Dans la section 3, nous relevons les particularités liées à l'intégration de tels critères à un modèle mathématique d'optimisation. Puis, nous adaptons une technique d'optimisation usuelle, appelée méthode de génération de colonnes, à trois critères de qualité de service que nous pensons représentatifs. Cette étude théorique s'appuie en partie sur une application de TAD, réellement mise en place dans le pays du Doubs central. Enfin dans la section 4, nous nous intéressons aux tournées de véhicules une fois celles-ci calculées et insérées dans un système d'information géographique (SIG). Les SIG intégrant un système de gestion de base de données (SGBD) permettent une vision multidimensionnelle des tournées (forme, temps, flux de passagers...) complètement plongées dans leur environnement. Cet outil est fondamental pour des géographes étudiant les interactions entre des systèmes de transport et leur territoire. Grâce au SIG, nous étudions comment la sinuosité peut être définie comme un critère de qualité de service pour des tournées de véhicules.

2 Critères de qualité de service

Les travaux sur les TAD sont assez nombreux. Néanmoins, les articles faisant référence à d'autres critères d'optimisation de tournées de véhicules que les seuls nombre de véhicules et distance totale parcourue sont très rares, même en tant qu'objectifs secondaires (Cordeau et Laporte 2003). Nous élargissons ici le sens commun de qualité de service, restreint au service offert aux usagers, vers un sens plus proche de la qualité globale du système. Dans ce cadre, nous formalisons – mathématiquement – puis classons les critères de qualité de service suivant deux dimensions plus ou moins corrélées.

La première est définie par la personne évaluant le TAD, qui peut être le passager, le chauffeur, la société de transport ou la collectivité locale. Les deux premiers sont focalisés sur les segments de tournées les concernant directement alors que les deux autres considèrent le système de façon globale et généralement à long terme. Deux questions se posent alors quant à l'évaluation d'un ensemble de tournées. Il s'agit du passage d'une évaluation partielle à une évaluation globale d'un critère (vis-à-vis des usagers par exemple) et de la combinaison des différents critères pris en compte. Ce dernier point,

même s'il peut être traité de façon purement « multicritère », est généralement traité pour ce type de systèmes, à des fins opérationnelles, par l'utilisation de contraintes et/ou d'une somme pondérée à minimiser (ou maximiser) pour les évaluations de chaque critère. L'agrégation d'un même critère, pour un ensemble de passagers par exemple, est généralement fait en utilisant là aussi une somme pondérée. Cette approche est plus discutable et a des effets de compensation pervers. Elle tient par exemple assez mal compte du pire des cas. Ces considérations amènent naturellement à une deuxième dimension d'analyse des critères de qualité de service qui est liée la vision de celui qui optimise. Après avoir défini et ordonné des niveaux spatiotemporels d'observation du système : rue, course, tournée, journée d'exploitation, année..., nous attribuons à chaque critère le plus petit des niveaux d'observation à partir duquel il est aisé – via une somme – de passer son évaluation aux niveaux supérieurs. Une rapide étude nous indique que la simple évaluation d'une seule tournée indépendamment du reste du système peut s'avérer difficile pour certains critères de qualité de service. En pratique, le traitement de tels critères doit passer par des approximations.

Nous considérons un TAD théorique (inspiré d'une étude de cas réelle) pour lequel chaque passager indique une heure de livraison souhaitée et se voit attribuer une limite sur sa durée de transport. Parmi tous les critères formalisés, nous en sélectionnons trois que nous pensons représentatifs des problèmes posés par leur évaluation. La distance totale parcourue correspond au critère d'optimisation classique. Le temps perdu correspond à l'écart de temps écoulé entre la date de ramassage effective et la date de ramassage au plus tôt qui est déduite de la date de livraison souhaitée par l'utilisateur. Enfin, le taux de remplissage des véhicules est envisagé.

3 Optimisation des tournées de véhicules

Pour chacun des trois critères sélectionnés, nous étudions le problème de calcul de tournées optimisées pour une journée d'exploitation. Pour cela, nous utilisons une méthode de programmation mathématique, appelée génération de colonnes, qui possède plusieurs propriétés qui la rendent efficace pour de nombreux problèmes de transport (Desaulniers, Desrosiers et Solomon 2005). Cette méthode a la particularité d'être exacte, ce qui signifie qu'elle garantit l'obtention d'une solution optimale en accord avec les contraintes et objectifs définis. Ce type de méthode n'est opérationnel que pour des problèmes de taille réduite autorisant des temps de calcul rela-

tivement longs. Dans le cas de TAD sous contraintes fortes, comme celui que nous étudions, le temps de calcul nécessaire pour des problèmes à 50 requêtes est de quelques secondes, mais peut dépasser une heure pour 200 requêtes. De tels temps de calcul restent satisfaisants pour des systèmes où les requêtes sont enregistrées la veille.

La méthode de génération de colonnes est une méthode itérative. À chaque itération, on sélectionne un sous-ensemble optimal parmi un ensemble courant de tournées. À partir de la résolution de ce sous-problème, on génère de nouvelles tournées susceptibles d'améliorer la solution courante. Ces nouvelles tournées sont ajoutées à l'ensemble courant des tournées. Une solution optimale est trouvée lorsqu'aucune tournée « améliorante » n'existe plus. Le problème de sélection des tournées est appelé problème maître et est résolu par l'algorithme du simplexe. Le problème de génération des tournées est appelé problème esclave et est résolu par programmation dynamique.

La minimisation de la somme des temps perdus par chaque passager est une simple adaptation de la méthode de génération de colonnes, classique pour les tournées de véhicules. Pour la minimisation des distances totales parcourues par les passagers, nous introduisons le fait d'utiliser la totalité des itinéraires offerts par le réseau routier, alors que les applications connues dans la littérature se restreignent à un sous-ensemble d'itinéraires minimisant un certain critère (le temps en général). Ces chemins alternatifs augmentent considérablement la taille des données du problème d'optimisation et soulèvent ainsi des difficultés pour sa résolution. Nous proposons des adaptations efficaces de la méthode classique de programmation dynamique résolvant le problème esclave pour traiter cette extension des itinéraires considérés. Enfin, la minimisation du taux de remplissage se modélise sous la forme d'un rapport à maximiser entre le remplissage des véhicules et la distance totale qu'ils parcourent. Un tel critère d'optimisation empêche une évaluation indépendante des tournées, ce qui est l'une des bases de l'efficacité de la méthode par génération de colonnes. Nous proposons deux méthodes. L'une est basée sur une sorte de changement de variable ramenant le problème à une forme plus adéquate. L'autre méthode proposée s'appuie sur l'algorithme de Dinkelbach (1967), qui résout une suite de problèmes eux-mêmes plus propices à l'utilisation de la génération de colonnes. Les résultats obtenus sur des instances de la littérature et des instances issues du TAD implanté dans le pays du Doubs central tendent à montrer, outre une certaine généralité de la

méthode utilisée, une grande similitude dans les solutions obtenues suivant chacun des trois critères. Ils montrent aussi que le gain obtenu par l'utilisation de chemins alternatifs peut être important dans notre contexte d'étude (de l'ordre de 10%).

4 Intégration des tournées à un SIG

Cette thèse est en partie basée sur le projet de mise en place d'un TAD dans le pays du Doubs central. Pour des raisons de souplesse de développement et surtout de pérennité au sein d'une entreprise privée (Prorentsoft), nous avons proposé une deuxième méthode constructive d'optimisation. Cette méthode non exacte est plus intuitive et convient naturellement à des systèmes en temps réel; ce qui est un secteur visé par l'entreprise. Une interface évoluée destinée aux opérateurs est prise en charge par Prorentsoft.

Cependant, nous avons intégré notre outil d'optimisation des tournées à un SIG que nous avons bâti à partir de plusieurs projets OpenSource (QGIS, PostGis, Postgres, MapServer,...). L'utilisateur visé est alors le chercheur en géographie qui souhaite plonger le fonctionnement d'un système de transport dans son environnement. Les tournées sont des éléments d'une base de données, composés, entre autres, d'objets géographiques. Ce nouvel outil permet de visualiser l'impact de plusieurs critères d'évaluation, dont la sinuosité des tournées. L'analyse de ce critère illustre l'utilisation d'un SIG

couplé à un moteur de calcul de tournées et est une première étape vers l'utilisation du critère de sinuosité comme objectif d'optimisation.

Le réseau routier du pays du Doubs central est représenté sur la figure 2. Chaque type de route est identifié par une couleur différente. Les voitures représentent les dépôts, et les drapeaux les arrêts. Sur la figure 3, on distingue, pour une tournée particulière (en rouge), les requêtes de transport 18 et 19 (« + » pour les ramassages et « - » pour les livraisons). La différence majeure par rapport à une carte « dessinée » est que chaque élément graphique correspond à un (ou plusieurs) élément(s) d'une base de données.

5 Conclusion

Dans cette thèse, nous proposons plusieurs variantes du problème classique de tournées de véhicules dans le cas des TAD. Nous montrons que certains des critères peuvent être efficacement optimisés grâce à la méthode de génération de colonnes. Les caractéristiques géographiques des tournées, qui ne sont pas directement intégrées au calcul, peuvent être étudiées à travers un SIG. Le nouvel outil liant SIG et algorithmes d'optimisation permet d'envisager l'établissement de correspondances entre les critères d'optimisation et les types de territoire. Pour parvenir à cet objectif, il reste à approfondir le problème de la combinaison de différents critères.

Bibliographie

- Ambrosino G., Nelson J.**, 2004, « Demand Responsive Transport Services : Toward the Flexible Mobility Agency », taly : ENEA.
- Bailly J.-P., Heurgon E.**, 2001, *Nouveaux rythmes urbains : quels transports ?*, La Tour d'Aigues, Édition de l'Aube, 222 p. (Société et territoire, Série prospective du présent)..
- Castex É. et Josselin D.**, 2007, « Temporalités éclatées : la réponse des transports à la demande aux nouvelles formes de mobilité », *Espace, population et sociétés*, 15 p.
- Cordeau J.-F, Laporte G.**, 2003. « The dial-a-ride problem (DARP) : Variants, modeling issues and algorithms », *4OR* 1, p.89–101.
- Desaulniers G., Desrosiers J., Solomon M.**, 2005, *Column Generation*, Springer.
- Dinkelbach W.**, 1967, « On nonlinear fractional programming », *Management Science* 13 (7), p.492–498.
- Finke G.** (Réd.), 2002, *Recherche opérationnelle et réseaux – Méthodes d'analyse spatiale*, Paris, Hermès Sciences Publications.
- Wiel M.**, 2002, *Ville et automobile*, Paris, Descarte Cie.

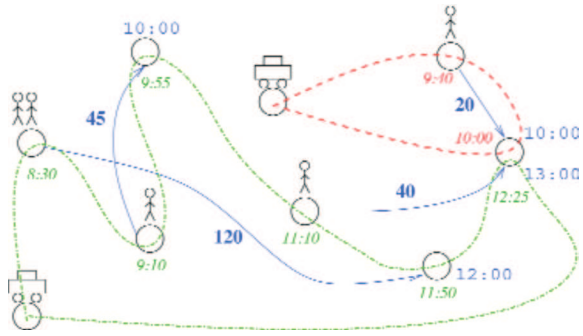


Figure 1 : Tournées de véhicules pour un TAD

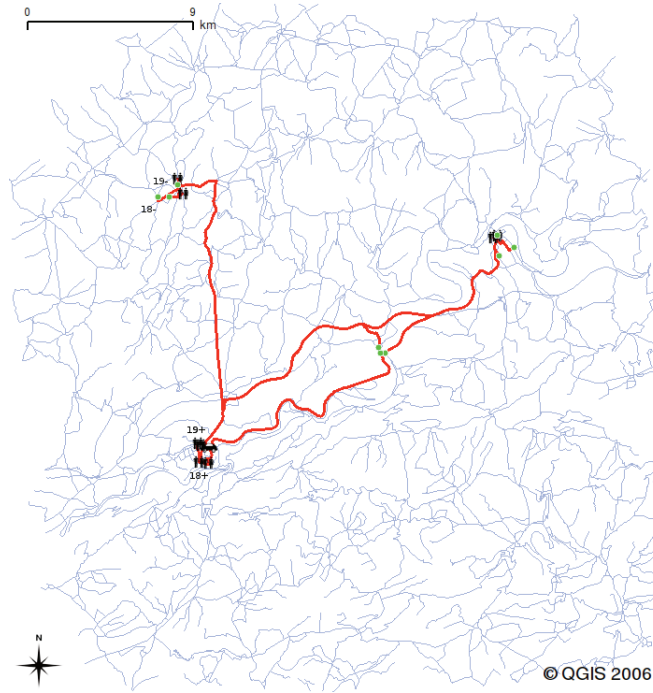


Figure 2 : Réseau routier du Doubs Central

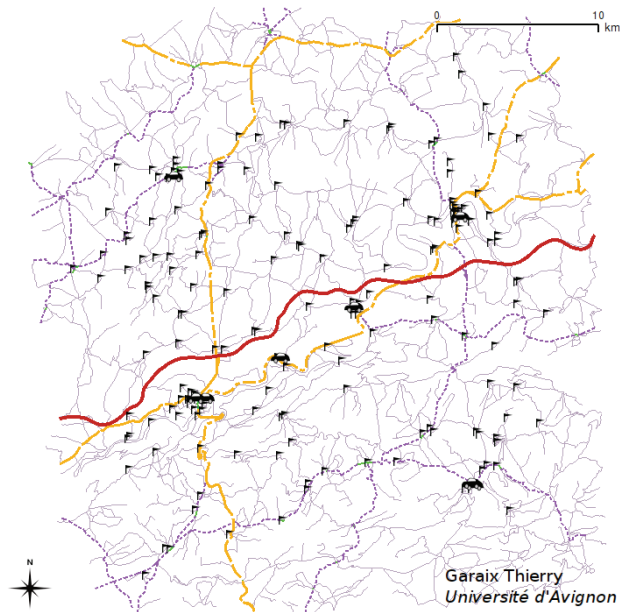


Figure 3 : Observation d'une tournée