OPTIMISATION DE TRANSPORT À LA DEMANDE DANS DES TERRITOIRES POLARISÉS

par Rémy Chevrier

Université Lille Nord de France, Ifsttar, ESTAS
20 rue Elisée Reclus
59666 Villeneuve d'Ascq Cedex
remy.chevrier@ifsttar.fr

Cette thèse pluridisciplinaire, géographique et informatique (géomatique), s'intéresse à la problématique du transport à la demande (TAD). Le TAD est un transport de personnes, collectif terrestre, activé seulement à la demande se situant à mi-chemin entre le taxi et le bus. L'idée porteuse de cette recherche est d'utiliser la structure polarisée des territoires pour faciliter une optimisation informatique d'un TAD en (multi)convergence, recourant, par exemple, aux aArbres cCouvrants et au modèle gravitaire. Cette approche se traduit notamment par une rationalisation des coûts économiques du service (regroupement des clients, nombre de véhicules nécessaires, temps de parcours...). Par ailleurs, cette thèse donne des éléments méthodologiques pour déployer un TAD usant d'une part de métaheuristiques (les algorithmes évolutionnaires) et d'autre part de modèles géographiques (la forme dite en convergence se basant sur le caractère polarisé du territoire). Des simulations permettent d'évaluer la capacité des méthodes développées à fournir de bonnes solutions dans un contexte opérationnel de forte montée en charge potentielle. Reposant sur le principe de convergence des flux, la méthode exploite la théorie des graphes pour définir les tournées des véhicules, elles-mêmes optimisées selon un algorithme génétique dédié, reposant sur une approche multicritère (approche de Pareto). La dernière partie de la thèse s'intéresse à l'influence du choix des métriques d'optimisation sur les solutions obtenues, compte tenu d'un territoire et d'une granularité spatiale donnés. Elle ouvre sur le questionnement suivant : quelle configuration d'optimisation pour quel territoire et pour quel usage ?

1 Introduction

1.1 Contexte

Les problèmes sociétaux rencontrés en ce début de 21e siècle, que sont la pollution et la congestion automobile amènent les sociétés à repenser les villes et surtout les manières de se déplacer. Longtemps considérée comme le seul moyen de déplacement, l'automobile devenue source de nuisances voit son usage et sa prépondérance remis en question. Jusqu'à une période récente, les villes étaient pensées et construites selon les vitesses des automobiles et ont par conséquent contribué à augmenter les distances de déplacement, tout en accroissant l'étalement urbain. L'effet en cascade est d'avoir encore favorisé l'utilisation de la voiture et donc contribué à congestionner les villes et à augmenter les émissions de polluants. À l'exception des très grandes villes telles que Paris, les agglomérations n'ont pu s'équiper de transports en commun capables de concurrencer la voiture, notamment sur les zones périurbaines. Face à ces questions de mobilité et de nouveaux besoins des usagers, le transport en commun, tel qu'il est pensé actuellement est difficilement capable de satisfaire les demandes, que cela concerne la desserte spatiale ou les horaires de frange (très tôt ou très tard).

Pourtant, le contexte actuel est favorable au renouveau du transport en commun, notamment en raison des coûts actuels des carburants qui incitent les automobilistes à changer leurs habitudes. Pour conquérir une plus grande part des modes de déplacement, le transport en commun doit s'adapter aux exigences de mobilité des individus. Par ailleurs, les technologies de communication (3G, GPRS, UMTS, WiFi...) et de positionnement (GPS, Galileo) ont bénéficié de remarquables améliorations au cours des dix dernières années profitant ainsi aux systèmes de transport intelligents. Parallèlement, les algorithmes de transport de personnes développés dans le cadre de la recherche opérationnelle permettent d'optimiser un ensemble d'objectifs satisfaisant les usagers d'une part et les prestataires d'autre part.

1.2 Proposition

Le transport à la demande (TAD), sujet d'étude de la thèse défendue, est une forme de transport souple déclenché si besoin. Combiné aux technologies énoncées, le TAD est capable de satisfaire les besoins en mobilité des usagers tout en rationalisant son fonctionnement. Cette rationalisation passe par l'amélioration de la qualité de service aux clients (durées des voyages, retards...) et par la réduction des coûts aux institutions (carburant, salaires...).

Cette thèse s'inscrit dans une démarche interdisciplinaire combinant géographie, informatique et recherche opérationnelle pour optimiser un service de transport à la demande. Dans cette optique, nous mettons en œuvre une approche originale consistant à développer des méthodes algorithmiques intégrant le territoire dans leurs fonctionnements. Le territoire, support des interactions spatiales, est en effet au cœur du problème de mobilité. Il reste souvent peu considéré, voire ignoré dans la recherche opérationnelle, du moins en informatique, et partiellement en économie spatiale. Nous pensons que sa prise en compte peut contribuer à améliorer significativement les services de transport à la demande. En effet, les interactions spatiales donnent lieu à des convergences dans les déplacements de personnes que nous pouvons exploiter pour faciliter les regroupements. Cette anisotropie (l'idée que nous explorons dans la thèse) est source d'efficacité mais également d'une grande variabilité dans les solutions obtenues (tournées de véhicules).

Nous basant sur cette hypothèse, nous développons plusieurs algorithmes répondant à un besoin particulier, correspondant à une configuration territoriale spécifique. D'abord contraint à un seul point de desserte, nous produisons deux algorithmes exacts et un algorithme génétique. Ensuite, nous généralisons le service de TAD à toute desserte à l'aide d'un algorithme génétique multi-objectif. Ce dernier algorithme constitue l'occasion d'étudier l'impact de l'utilisation de métriques différentes dans l'évaluation des solutions produites. Dans ce cadre, nous proposons d'utiliser la moyenne généralisée de Hölder (Bullen, 2003) et les normes *Lp* (distance de Minkowski) pour montrer le lien pouvant exister entre la manière d'optimiser d'une part et le service à déployer d'autre part compte tenu du territoire. Cette thèse réalisée grâce au soutien de la Communauté d'agglomération du Pays de Montbéliard, a également donné lieu à deux expérimentations réelles, dans lesquelles nous avons été directement impliqués. Les expérimentations réalisées à Montbéliard ont permis, par le biais d'un transfert de technologie auprès d'une société privée, de déployer un service de transport à la demande utilisant nos algorithmes.

1.3 Plan de la thèse

La première partie a pour objet de définir le cadre de recherche de la thèse. En premier lieu, nous rappelons le contexte sociétal dans lequel s'inscrivent les travaux présentés et en quoi ils peuvent contribuer au fonctionnement de la société. Ensuite, nous justifions l'intérêt d'une démarche interdisciplinaire dans notre étude et nos développements consacrés au transport à la demande. Le territoire étant au centre de notre méthodologie, il semble opportun de rappeler les modèles décrivant les interactions spatiales et en quoi ces modèles peuvent aider notre démarche.

Dans la deuxième partie, nous décrivons et formalisons nos travaux. À partir des polarités du territoire, nous mettons en évidence la convergence des flux de personnes à partir de laquelle nous proposons des méthodes de construction de graphes spécifiques. Sur ces graphes nous appliquons des algorithmes dédiés, dont la forme la plus aboutie est un algorithme génétique multi-objectif utilisant la moyenne généralisée de Hölder et les normes *Lp*. Dans cette partie, nous fournissons également un descriptif détaillé des algorithmes génétiques ainsi que des exemples détaillés illustrant leur fonctionnement.

La dernière partie consacrée aux simulations et expérimentations présente au lecteur un ensemble de résultats justifiant notre démarche. Ces résultats sont basés sur des cas concrets (Montbéliard) et viennent justifier le rôle du territoire. Par ailleurs, nous proposons une étude consacrée à l'impact de la moyenne de Hölder et des normes *Lp* sur l'optimisation. Au cours de cette étude, nous comparons plusieurs configurations d'optimisation sur plusieurs ensembles d'instances de tests issues de modèles gravitaires et d'un modèle aléatoire.

2 Résultats de la thèse

Le territoire joue un rôle optimisant dans le déploiement d'un service de transport à la demande. En effet, les différents points abordés au cours de la recherche et les éléments étudiés concordent dans la thèse avancée. En premier lieu, nous avons décrit le contexte actuel des transports en commun et justifié le besoin d'un transport intermédiaire au service taxi et au transport en commun (bus). Le besoin en mobilité exprimé par les usagers et le contexte énergétique et environnemental contribuent pour chacun à revaloriser le transport en commun au détriment de la

voiture, elle-même devenue dans le même temps synonyme de nuisances. Pour réaliser un transport en commun répondant aux nouvelles exigences de mobilité et contribuant au développement durable, il semble opportun d'utiliser d'une part les technologies de l'information et de la communication et d'autre part les méthodes d'optimisation du *dial-a-ride problem* (DARP) (Cordeau et Laporte, 2007) qui est le problème académique du transport de personnes. Le TAD, dans sa forme idéale, est un service de DARP hautement flexible et adaptable. Équipé de ces technologies et utilisant de bonnes méthodes d'optimisation, le TAD est capable de répondre à une demande croissante à moindre coût. Pour améliorer l'optimisation d'un service de TAD, nous utilisons la typologie des TAD établissant le rôle du territoire dans les formes existantes (Castex, 2007 ; Castex, Josselin, 2007). C'est donc une démarche interdisciplinaire qui a motivé notre recherche et son déroulement. En effet, l'intégration même de cette typologie dans les algorithmes d'optimisation du DARP que nous avons produits, va bien au-delà de la simple démarche pluridisciplinaire. La typologie des TAD et les formes dites en convergence traduisent les effets des polarités des espaces géographiques, mettant ainsi en évidence leur non-isomorphie.

Les modèles évoqués dans la partie 1, et plus particulièrement le modèle gravitaire, formalisent ces interactions. Ces dernières peuvent être évaluées à deux niveaux de découpage territorial : IRIS et communes, dont nous avons connaissance sur le Pays de Montbéliard, notre terrain d'application. Nous basant sur la polarité des territoires, nous mettons en évidence la convergence des flux (partie 2) qui sont à la base de nos méthodes de résolution et de construction de graphes. Ces derniers constituent les supports d'application des algorithmes d'optimisation du TAD. Nous déterminons plusieurs niveaux de convergence, qui prêtent chacun à la mise en œuvre d'une structure particulière : monoconvergence, monodivergence, multiconvergence. Les formes les plus simples (mono-) traduisent généralement la desserte d'un lieu attractif comme une gare, tandis que la multiconvergence transcrit la réalité, où plusieurs polarités se manifestent et font émerger une structure de flux. L'utilisation des différents niveaux de découpage territorial contribue à mettre en exergue le métagraphe des demandes de transport, qui constitue la super-structure des déplacements, pouvant servir notamment à prépositionner des véhicules. À l'aide des graphes construits, nous appliquons les algorithmes de résolution de tournées dédiés. Les premiers algorithmes sont consacrés au problème de desserte en monoconvergence et utilisent l'arbre couvrant tentaculaire (ACT), un objet spécifiquement conçu pour résoudre le TAD dans cette topologie (Chevrier *et al.*, 2006 ; Chevrier *et al.*, 2008). Pour rappel, une branche de l'ACT indique le chemin à parcourir par le véhicule affecté et le nombre de branches correspond au nombre de véhicules requis.

Ainsi, le premier algorithme utilise une méthode incrémentale pour énumérer exhaustivement les ACT du graphe. Le deuxième algorithme, de type « parcours en largeur », est plus économique en ressources et cherche les ACT optimaux du graphe (ceux ayant le moins de branches). Le troisième algorithme développé pour la monoconvergence est génétique et agrège un ensemble d'objectifs. Ces trois algorithmes concluent une première phase de recherche consacrée à la mise en place de services spécifiques tels que la desserte du « Marché de Noël » (partie 3). Au vu des bons résultats opérationnels de l'algorithme génétique (Chevrier *et al*., 2008), nous avons décidé de poursuivre dans cette voie pour généraliser notre méthode à la multiconvergence. Néanmoins, soucieux des problèmes engendrés par l'agrégation d'objectifs que sont la mise à l'écart de bonnes solutions potentielles et le manque d'exploration de l'espace de solutions, nous réorientons nos développements vers une solution méthodologique intégrant une optimisation multi-objectifs se basant sur une approche Pareto pour explorer au mieux l'espace de solutions et fournir ainsi un plus grand choix de solutions opérationnelles. Le choix de NSGA-II, un algorithme évolutionnaire multi-objectifs, nous permet alors d'optimiser concurremment un ensemble d'objectifs antagonistes et d'explorer largement le front de solutions. La grande diversité de solutions produites est un atout pour l'AOT, dernière à décider de la solution à mettre en œuvre. De plus, notre volonté de jouer préférentiellement sur tel aspect de l'optimisation ou tel autre nous a amené à reconsidérer la manière d'optimiser un objectif. C'est pourquoi, nous nous sommes penchés sur la moyenne généralisée de Hölder (Bullen, 2003) pour réduire les temps de parcours et sur les normes *Lp* pour minimiser les retards (Chevrier, Josselin, 2008). L'intégration de ces fonctions dans notre méthode vient corroborer la thèse selon laquelle les paramètres d'optimisation sont à moduler selon la topologie du territoire d'application du service et selon le type du service (priorité à la réduction du nombre de véhicules ou des émissions de polluants ?)

Pour valider la thèse, nous avons généré des instances de transport à partir d'un modèle gravitaire, représentatives de la réalité observée sur le Pays de Montbéliard (fig. 1). Les jeux d'essais produits ont aidé à simuler les différents services mis en application (Mod'Gen) et ceux qui pourraient voir le jour (service généralisé en multiconvergence). Les résultats observés sur les temps de calcul viennent conforter le caractère opérationnel de nos applications. Face à une forte montée en charge, les algorithmes génétiques font preuve d'efficacité dans leur capacité à produire de bonnes solutions (cf. (exemple de solution décrit par la figure 2). Le dernier chapitre de la thèse présente une étude sur les métriques et leur impact sur l'optimisation dans le cadre de la multiconvergence. Les observations relevées sur les modèles gravitaires d'une part et le modèle aléatoire d'autre part montrent des différences significatives entre les deux types de modèle. En revanche, des similitudes apparaissent nettement entre les deux modèles gravitaires. De plus, les performances des configurations d'optimisation varient selon l'objectif prioritaire. Que celui-ci soit la recherche du plus faible nombre de véhicules requis ou qu'il soit la réduction des retards, la configuration d'optimisation « idéale » peut varier du tout au tout. Pour l'heure, nous observons des régularités dans les meilleures configurations à adopter dans certains cas de figures et selon l'usage que nous souhaitons. Néanmoins, il demeure encore trop tôt pour établir le bon usage d'une configuration pour un contexte particulier. D'un autre point de vue, ces observations militent en faveur d'une recherche plus poussée sur la moyenne généralisée de Hölder et la distance de Minkowski, pour comprendre la sémantique cachée de ces outils mathématiques dans le cadre d'une optimisation de service de TAD. En outre, ces mêmes observations viennent confirmer notre thèse que le territoire joue un rôle fondamental dans l'optimisation d'un service de transport et qu'il doit y être intégré.

3 Perspectives

Nous pouvons nous interroger sur le lien sémantique existant entre les outils mathématiques et les topologies de l'espace. Pour cela, de nouveaux résultats demeurent à produire, notamment en utilisant les configurations d'optimisation, mentionnées dans cette thèse, mais non utilisées. Ces résultats, issus d'optimisations similaires avec une approche Pareto, contribueront certainement à maîtriser davantage les mécanismes sous-jacents à l'exploration de l'espace des solutions avec différentes métriques.

Bien des méthodes restent à étudier. L'algorithme d'énumération d'une part et le parcours en largeur d'autre part sont à compléter et à approfondir, afin de produire des solutions exactes et repousser leurs limites de calculs. D'autres pistes sont à envisager, comme les méthodes hybrides couplant des types d'algorithmes différents, tels les algorithmes génétiques avec une méthode taboue en recherche locale. Ces méthodes hybrides se montrent souvent pertinentes pour explorer davantage le front de solutions. L'algorithme génétique que nous avons développé (dans sa forme la plus aboutie), est basé sur NSGA-II. Or, si nous souhaitons dériver notre moteur d'optimisation vers d'autres cœurs d'application (les algorithmes SPEA2, IBEA, …), il faut nécessairement réécrire une partie du code. Ainsi, à des fins de réutilisabilité, il semble opportun d'utiliser des plates-formes d'optimisation telles que ParadisEO (Liefooghe *et al.*, 2011). Cet outil implémente un ensemble d'algorithmes évolutionnaires et nous a permis récemment d'effectuer des comparaisons immédiates d'efficacité des différents algorithmes sur le problème d'optimisation du TAD (Chevrier *et al.*, 2012). De plus, les bons résultats affichés de l'algorithme génétique avec l'approche Pareto nous invitent à considérer davantage son utilisation dans les problèmes d'aménagement du territoire et plus spécifiquement dans les problèmes d'aménagement urbain. Au moment où nous parlons de « ville durable », les métaheuristiques pourraient effectivement aider les aménageurs à (re)penser les villes de demain, en intégrant tous les objectifs de réduction des émissions de gaz à effet de serre, de limitation des rejets de déchets ou encore de l'abaissement des distances à parcourir. En outre, le fait que le territoire intervienne dans l'optimisation de transport nous laisse supposer que ce type de phénomène existe également dans d'autres problèmes d'optimisation et que d'une manière générale, les problèmes ne doivent pas être étudiés isolément, mais au contraire que leur résolution doit s'inscrire dans une démarche interdisciplinaire. Car c'est probablement avec cette approche que de nouvelles méthodes d'optimisation efficaces verront le jour.

Bibliographie

Bullen P., 2003, « *Handbook of means and their inequalities* », Springer.

Castex É., 2007, « *Le transport à la demande en France : de l'état des lieux à l'anticipation* », Thèse de dDoctorat, Université d'Avignon et des pPays du Vaucluse.

Castex É., Josselin D., 2007, « Temporalités éclatées : la réponse des transports à la demande aux nouvelles contraintes temporelles des mobilités », *Espace, pPopulation et sSociétés*, n°2-3, p.433-447.

Chevrier R., Josselin D., 2008, « Optimisation d'un transport à la demande en fonction des normes Lp. Approche par front de Pareto et algorithme génétique », dans *Actes du colloque international Sageo 2008*, Montpellier.

Chevrier R., Canalda P., Chatonnay P., Josselin D., 2006, « Comparison of three algorithms for solving the convergent demand responsive transportation problem », dans *ITSC'2006, 9th Int. IEEE Conf. On Intelligent Transportation Systems*, Toronto, p.1096-1101.

Chevrier R., Castex É., Josselin D., Canalda P., Chatonnay P., 2008, « Un algorithme génétique pour le transport à la demande en convergence », *Revue iInternationale de gGéomatique*, n°18(2), p.239-265.

Chevrier R. Liefooghe A., Jourdan L., Dhaenens C., 2012, « Solving a dial-a-ride problem with a hybrid evolutionary multi-objective approach: application to demand responsive transport », *Applied Soft Computing*, n°12, p.1247-1258.

Cordeau J.-F., Laporte G., 2007, « The dial-a-ride problem : models and algorithms », *Annals of Operations Research*, n°54, p.573-586.

Liefooghe A., Jourdan L., Talbi E.-G., 2011, « A software framework based on a conceptual unified model for evolutionary multiobjective optimization : ParadisEO-MOEO », European Journal of Operational Research, n°209(2), p. 104-112.

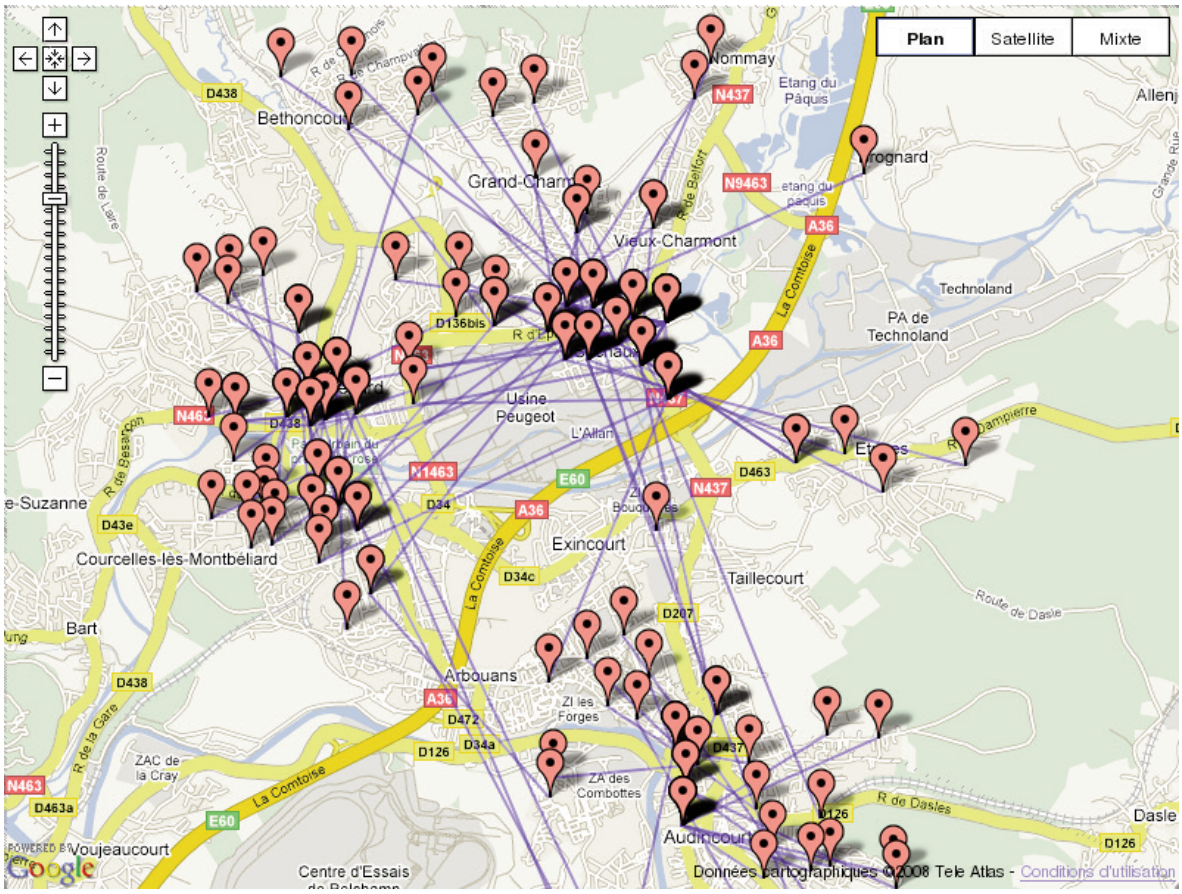

Figure 1 : Exemple d'instance de TAD sur le Pays de Montbéliard

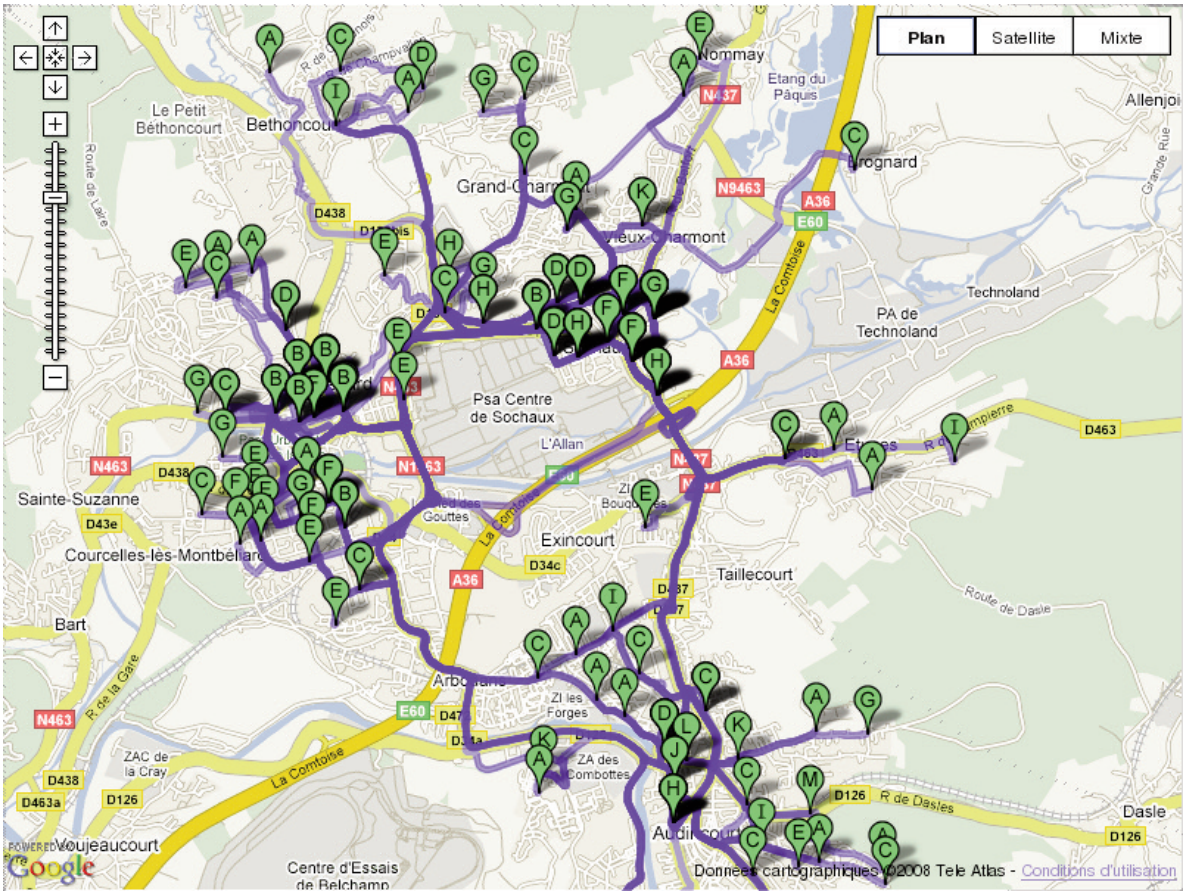

Figure 2 : Une solution de transport avec neuf véhicules