

Modèles et méthodes pour la logistique urbaine: les problèmes de tournées de véhicules à deux échelons

Jesus Gonzalez-Feliu

▶ **To cite this version:**

Jesus Gonzalez-Feliu. Modèles et méthodes pour la logistique urbaine: les problèmes de tournées de véhicules à deux échelons. 2013. halshs-00922810

HAL Id: halshs-00922810
https://shs.hal.science/halshs-00922810

Preprint submitted on 30 Dec 2013

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Modèles et méthodes pour la logistique urbaine: les problèmes de tournées de véhicules à deux échelons

Jesús González Feliu
Centre National de la Recherche Scientifique, UMR 5593 LET
14 Avenue Berthelot
69363 Lyon Cedex 07
FRANCE

Résumé : Ce travail s'intéresse à la modélisation du transport de marchandises en ville dan sune optique d'aide à la décision, plus précisément sur les problèmes de tournées de véhicules (PTV) en introduisant une nouvelle variante qui combine deux niveaux ou échelons dans une approche systémique. Dans un premier temps, les principales expériences de " city logistics " en Europe son présentées, en faisant un zoom sur l'Italie, ainsi que des lignes d'action dans la planification des systèmes de distribution urbaine des marchandises qui puissent devenir opérationnels et efficients. Ensuite, cette thèse s'intéresse les principales problématiques et limites de l'optimisation de systèmes de transports à niveaux multiples, en unifiant les concepts et la notation via une proposition théorique de la gestion de systèmes de transport multi-niveaux. Ensuite, une nouvelle famille de problèmes est introduite. Ces problèmes d'optimisation de tournées de véhicules s'intéressent à des systèmes à niveaux multiples, en détaillant le cas basique : le problème de routes de véhicules à deux niveaux. Nous proposons des modèles mathématiques pour ce problème et des résultats numériques pour illustrer les avantages et les limites de la modélisation de ces systèmes.

Mots clé : logistique urbaine ; problème de tournées de véhicules ; systèmes multiniveaux ; management ; localisation.

Ce travail est une synthèse de la thèse intitulée *Models and Methods for the City Logistics*, soutenue le 12 mai 2008 au Politecnico di Torino, Turin, Italie. Pour citer ce document :

Gonzalez-Feliu, J. (2013), Modèles et méthodes pour la logistique urbaine: les problèmes de tournées de véhicules à deux échelons. Cahier de Recherche LET.

Pour citer la thèse :

Gonzalez-Feliu, J. (2008), *Models and Methods for the City Logistics – The Two-echelon Capacitated Vehicle Routing Problem*. PhD. Thesis. Politecnico di Torino, Turin, Italy.

Modèles et méthodes pour la logistique urbaine: les problèmes de tournées de véhicules à deux échelons

Jesús González Feliu

Directeur de Thèse : Pr. Roberto Tadei
Membres du Jury : Pr. Federico della Croce di Dojola (président), Dr. Andrea Grosso (rapporteur), Dr. Giuliana Carello (rapporteur)

1. Introduction

La distribution de marchandises est un secteur en constant développement et constitue un facteur économique important. Par contre, dans les villes, il contribue notamment aux problèmes de congestion, pollution, bruit et d'autres dérangements à la population des villes. Pour faire face à ces problèmes, une nouvelle discipline est née à la fin du XX^{e} siècle, la « City Logistics », qui a comme objectifs principaux la réduction de la congestion, la pollution et le bruit occasionné par le transport de marchandises en ville. Dans les dernières années, plusieurs études et expériences se sont développées en toute l'Europe, mais pour l'instant une politique commune en matière de logistique urbaine n'a pas encore été proposée par l'Union Européenne. En Italie, seulement certaines villes de petite taille ont expérimenté des politiques de « city logistics » avec succès, mais sans un lien entre elles. Nous observons que ces expériences utilisent des centres urbains de distribution de marchandises, ce qui peut se traduire en un système de transport à deux ou plus niveaux. Plusieurs études en recherche opérationnelle ont traité des problématiques liées à des systèmes à niveaux multiples pour la distribution de marchandise. Néanmoins, l'optimisation des coûts de transport est en générale réalisé en considérant chaque niveau indépendant des autres, ou en approximant les coûts du transport dans certains niveaux pour simplifier. Un autre problème est le manque d'une unification de la terminologie utilisée dans ces études, qui rend difficile la recherche bibliographique. Pour ceci, et après un première recherche documentaire, il a été décidé d'axer la thèse sur les systèmes multiniveaux de transport, dans une optique de management et d'optimisation, tout en tenant compte la vision publique de la logistique urbaine et son encrage dans les différents territoires des agglomérations.

Le but de cette thèse a été de proposer des lignes guide d'action en matière de planification de la distribution urbaine de marchandises, en unifiant certains termes, ainsi que de présenter une famille de problèmes d'optimisation de routes des véhicules qui considère les systèmes à niveaux multiples dans son ensemble et pas comme une somme de systèmes indépendants (Gonzaelz-Feliu, 2008). Elle est divisée en 7 chapitres :

Le premier chapitre présente le contexte général de la logistique urbaine via une introduction chronologique et la présentation de la définition de base de la « city logistics » (au sens de Taniguchi et al., 2001). Ensuite, une série d'expériences, la plupart liées à la notion de centre de distribution urbaine (CDU) sont présentées. Les expériences italiennes sont plus approfondies, dans ce travail, mais une vision d'ensemble des principaux apys d'Europe en terme de logistique urbaine (France, Allemagne et Pays Bas) est aussi faite. De plus, d'autres expériences intéressantes en provenance d'autres pays ont été analysées. Il faut noter que non seulement les succès sont présentés, aussi les échecs sont analysés. Après cette analyse, les principaux éléments pour la définition d'une solution de logistique urbaine sont proposés.

Le deuxième chapitre porte sur les systèmes logistiques à plusieurs niveaux, ou échelons. Ce chapitre souhaite apporter un regard théorique aux systèmes de transport et de logistique en introduisant la vision de système dans l'analyse, la planification et le management de ces systèmes.

En commençant par la notion de chaîne logistique (supply chain), les systèmes multiniveaux sont définis en présentant en détail leurs éléments constitutifs. Ensuite, une revue de littérature sur la question est effectuée.

Le troisième chapitre porte sur les problèmes de tournées de véhicules, très étudiés dans la littérature (Toth et Vigo, 2002 ; Cordeau et al., 2007). En partant de la version de base du problème, les différentes variantes du problème, ainsi que les principales méthodes de résolution, sont revues et synthétisées. A partir de cette revue de la littérature, la contribution de la thèse est annoncée et motivée, en justifiant son intérêt par rapport à la problématique.

Les chapitres 4 et 5 portent sur les problèmes de tournées de véhicules à niveaux multiples. Le problème d'optimisation est présenté et ses principales variables, constantes, paramètres et relations définies dans le chapitre 4. Ensuite, dans le chapitre 5, le problème de tournées à deux niveaux est détaillé, allant jusqu'à la définition de deux modèles mathématiques, qui sont présentés et comparés. Ensuite, pour des raisons de temps de calcul, le premier modèle est retenu.

Dans le chapitre 5, le modèle retenu est testé. Plusieurs jeux de données sont définis (pour des situations de distribution régionale ensuite de distribution urbaine) et le modèle est utilisé pour résoudre les problèmes d'optimisation qui en découlent. Dans un premier temps, une analyse d'accessibilité est faite pour étudier l'intérêt d'utiliser des systèmes de distribution à deux niveaux pour livrer une ville. Ensuite, des jeux de test plus ciblés sur la distribution urbaine avec différentes stratégies de localisation des plates-formes de consolidation-distribution sont proposés et simulés.

Le chapitre 7 propose une méthode de résolution du problème en utilisant la génération de colonnes (Desrosiers et al., 1984). Deux nouvelles représentations du problème sont proposées et la méthode de génération de colonnes décrite. Des tests ont été effectués et les résultats commentés. Jugés peu satisfaisants, les résultats ont porté à conclure sur le fait que la méthode envisagée est peu adapté au problème. Une nouvelle méthode est aussi proposée en recommandation pour des futures recherches.

2. Une vue d'ensemble de la logistique urbaine

Jusqu'aux années 80, le transport de marchandises a été principalement géré par les entreprises privées, y compris dans ses parties terminales (le dernier kilomètre) à l'entrée ou l'intérieur des zones urbaines (Crainic et Laporte, 1997 ; Crainic et al., 2004). Dans les années 90, la prise de conscience que les autorités publiques doivent intervenir dans la gestion et la planification du transport de marchandises en ville a donné lieu à des réflexions autour de la logistique urbaine. La notion de « city logistics » a été introduite dans les années 90 par Ruske (1994) puis complétée par Taniguchi et al. (2001). Elle peut être définie comme le processus d'optimisation complète des livraisons à destination du centre-ville sans pour ainsi pénaliser le développement économique des activités de ces quartiers (Taniguchi et al., 2001). On compte à ce jour plusieurs dizaines d'expériences et de travaux de recherche (Cost 321, 1998 ; Patier, 2001 ; Taniguchi et al., 2001 ; Crainic et al., 2004). La city logistics a ainsi trois objectifs principaux :

- Réduire la congestion et améliorer la fluidité du traffic lié au transport de merchandise dans les aires urbaines.
- Réduire la pollution et le bruit, contribuer à la réduction d'émission de gaz à effet de serre d'après le protocole de Kyoto et améliorer les conditions de vie des habitants de la ville.
- Eviter de pénaliser les activités économiques des villes de façon à ne pas « vider » ces zones.

Au niveau européen, une première actions fédératrice a eu lieu à la fin des années 90 (COST 321, 1998). Les principales mesures et méthodes utilisés dans les différents pays européens participant à l'action ont été examinées, tant du point de vue de la rentabilité économique que des avantages environnementaux. A partir de ces analyses, trois champs d'action ont été identifiés : l'efficience du transport de marchandises, les infrastructures et la technologie (COST 321, 1998). De plus, unesérie de recommandations ont été formulées :

1. Il est important de tenir compte des différences entre les villes et de reconnaître les différents contextes. Il n'y a pas de politique publique optimale dans l'absolu mais un ensemble d'objectifs et un besoin global d'information et compréhension en matière de transport de marchandises en ville.
2. Les actions individuelles en soi ne sont pas adaptés à traiter la complexité de la problématique du transport de marchandises en ville ainsi que l'interaction entre ses différents acteurs, leurs secteurs d'activité et les politiques publiques.
3. Les interfaces intermodales innovatrices peuvent jouer un rôle majeur dans l'amélioration globale du secteur du transport urbain de marchandises à travers une rationalisation de la demande et une réduction de nuisances imputées au transport de marchandises en ville.
4. Les améliorations techniques (motorisation, composantes des véhicules, etc.) constituent aussi une piste importante pour l'amélioration de la logistique urbaine.

Après avoir regardé la vision européenne, encore à un stade embryonnaire, une analyse des principales expériences de logistique urbaine en Europe a été réalisée. Pour ceci, une analyse de la littérature existante (peu nombreuse en termes d'expérimentations en 2007), ainsi qu'une analyse des cas italiens (recueillis à travers retours d'expériences, d'articles issus de la presse professionnelle et de comptes rendus des rencontres de l'association City Logistics). Ces analyses sont synthétisées dans le tableau suivant :

Tableau 1. Synthèse des expériences proposées

Pays	Prise en compte institutionnelle	Exemples opérationnels	Exemples non opérationnels
Allemagne	Initiatives privées, peu de soutien des collectivités (tant sur le plan économique que réglementaire. Pas de coordination nationale.	Berlin, Breme, Kassel, Fribourg (CDUs) Munich (seul exemple de réglementation)	Non présentés
France – Monaco	Soutien local des collectivités, principalement réglementaire mais aussi économique. Coordination à travers un programme national.	La Rochelle, Monaco (CDUs) Paris (La Petite Reine, Chronopost)	Non précisés
Pays Bas	Soutien reglémentaire en termes d'accès. Pas de coordination natinonale.	Amsterdam, Utrecht	Non précisés
Italie	Soutien réglementaire des collectivités locales. Coordination régional dans deux cas (aides économiques). Mise en place d'une association pour la coordination nationale.	Ferrara, Milan, Padoue, Vicenza (CDUs)	Gènes, Naples (CDUs)
Royaume Uni	Action principalement réglementaire. Pas vocation à promouvoir le CDU public. Pas de coordination nationale.	Londres (péage urbain)	Non précisés
Suisse	Cas spécifique. Peu d'information sur l'implication des autorités publiques en dehors de l'exemple proposé.	Non précisés	Basile (CDU)
Danemark	Cas spécifique. Peu d'information sur l'implication des autorités publiques en dehors de l'exemple proposé.	Copenhague (système de credits)	Non précisés
Espagne	Cas spécifique. Peu d'information sur l'implication des autorités publiques en dehors de l'exemple proposé.	Malaga (CDU)	Non précisés

La leçon que l'on peut tirer de de ces expériences en Europe est que le seul objectif de massifier les tournées intra-urbaines ne peut suffire à justifier économiquement une nouvelle infrastructure et une modification de l'organisation habituelle des transporteurs, car le coût de la rupture de charge supplémentaire dans la chaîne logistique, notamment lorsque cette rupture de charge se fait dans un terminal situé en milieu urbain, n'est pas compensé par le gain financier lié à la rationalisation des flux. Une solution de logistique urbaine doit avant tout être économiquement viable. La seule présence d'une plate-forme logistique (comme le CDU) ne suffit dans aucun des cas à assurer cette continuité. Plusieurs éléments, de nature différente, doivent être considérés dans la préparation et la planification d'un système de logistique urbaine durable dans les trois dimensions – sociale, économique et environnementale- du développement durable. L'analyse des expériences de

logistique urbaine présentée a permis d'identifier un groupe de composantes à tenir compte dans la mise en place d'une action de logistique urbaine :

- *Infrastructures.* Les CDU sont les plates-formes de base du système considéré (et un soin tout particulier doit être apporté à la recherche d'espace foncier disponible en ville à proximité de la zone à desservir), mais ils ne sont pas le seul type d'infrastructure logistique. Des voies préférentielles ou des lieux de stationnement réservés au transport de marchandises peuvent favoriser l'usage du système pour les livraisons en zone dense.
- *Organisation logistique et des transports.* Cette composante contient les principales actions dans la conception, la planification et l'optimisation de la chaîne logistique du système. Ces aspects permettent de définir les principales stratégies d'organisation logistique du système.
- *Technologies.* Deux types de technologies sont en général utilisés. Les technologies d'information et de communication (TIC) favorisent l'échange des données, le suivi de la marchandise ou du véhicule ainsi que d'autres opérations de soutien au transport. Les technologies du véhicule, plus précisément celles liées à la motorisation, permettent une réduction des émissions de polluants du véhicule, jouant en faveur d'une meilleure qualité de l'air.
- *Communication.* Cette composante contient les actions et moyens pour la communication en direction des utilisateurs potentiels du système et des autres acteurs concernés directe ou indirectement par le système de logistique urbaine.
- *Financement.* Dans la majorité des systèmes de logistique urbaine, le seul financement privé ne suffit pas à couvrir les coûts de mise en place d'un CDU et de la flotte de véhicules (souvent des véhicules « propres ») du système. Normalement, des subventions des autorités publiques et l'utilisation à coût faible de plates-formes existantes sont les formes les plus courantes d'aide au démarrage d'un projet de logistique urbaine. Les coûts opérationnels de ces systèmes peuvent être couverts par les revenus dans certains cas, c'est le cas notamment pour les systèmes où le gestionnaire est aussi l'acteur immobilier logistique.
- *Réglementation.* Les autorités publiques peuvent mettre en place une législation ou toute autre forme de réglementation pour favoriser l'utilisation du système proposé. Cette réglementation peut être restrictive (passage obligatoire ou au moins fortement contrainte) des véhicules par le CDU ou au contraire fondée sur des avantages accordés aux utilisateurs.

La problématique de la thèse se porte ensuite sur l'aspect organisationnel. Si un CDU implique plusieurs niveaux et acteurs qui collaborent, il est important de les étudier dans une vision systémique. C'est sur ces aspects que la thèse s'est concentré, principalement sur des aspects théoriques et conceptuels, comme le montrent les chapitres suivants.

3. Les systèmes de transport multiniveaux

La planification stratégique est une étape fondamentale en logistique urbaine mais aussi dans la gestion du transport de marchandises. En outre, la faisabilité du système de transport de fret et son adaptation aux différents besoins et l'environnement général doivent être étudiés pour assurer sa continuité dans le temps. Il est donc important d'examiner les différentes motivations qui définiront les politiques principales du prestataire logistique et de transport en termes de service (par exemple, les caractéristiques et la quantité des marchandises à transporter , les besoins du client , les coûts d'infrastructure et d'exploitation et d'autres , le type des services, la réglementation et sanctions en cas de non-respect, etc.)
Dans ce chapitre, les principales stratégies de transport sont décrites , mettant l'accent sur l'importance de distribution multiniveaux. Après une brève introduction des concepts de base sur les

systèmes de distribution multiniveaux, des exemples réels de cas sont présentées ainsi qu'une revue synthétique des contributions de la littérature sur ce sujet.

L'un des éléments principaux de la planification stratégique d'un système de transport de fret est la définition des différentes stratégies d'expédition. Aujourd'hui, il existe plusieurs stratégies , mais elles sont basées sur une série de points principaux :

- **Mode de transport :** en raison de motivations différentes (caractéristiques et la quantité des marchandises à transporter, distance à parcourir , coûts , urgence , ...) une solution de transport sera définie en utilisant un ou une combinaison de véhicules, en fonction de l'offre de transport, par mode (routier, ferroviaire, maritime, aérien ou flucial). Si le transport est réalisé en utilisant plus d'un de ces modes , le transport est appelé multimodal ou intermodal, sinon, les stratégies proposées sont monomodales.
- **L'utilisation des véhicules :** Dans certaines stratégies de transport routier , les véhicules sont chargés à pleine capacité, i.e. le véhicule est utilisé pour réaliser un transport direct entre un origine et une destination (où se trouve un seul client). Cette politique de transport est connue comme transport en "camion complet" (Truckload, ou TL en anglais). Au lieu de cela, dans d'autres cas, principalement en ville, le transport est organisé en tournées, suivant une logique de groupage-dégroupage et livrant plusieurs destination (donc plusieurs clients) dans la même tournée. Cette politique de transport est connue comme "groupage-dégroupage" ou "transport en tournées" (less than truckload ou LTL en anglais).
- **Niveau hiérarchique :** Cet aspect peut être définie par deux groupes de stratégies (transport direct et stratégies multiniveaux). Un transport direct est celui qui s'effectue avec le même véhicule depuis l'origine jusqu'à chacune des destinations, sans transbordement ni changements dans la marchandise transportée. Un transport multiniveau est caractérisé par un ou plusieurs points de rupture de charge, où la marchandise est transférée à dautres véhicules. Il faut noter que le transport intermodal est frocément multiniveaux.

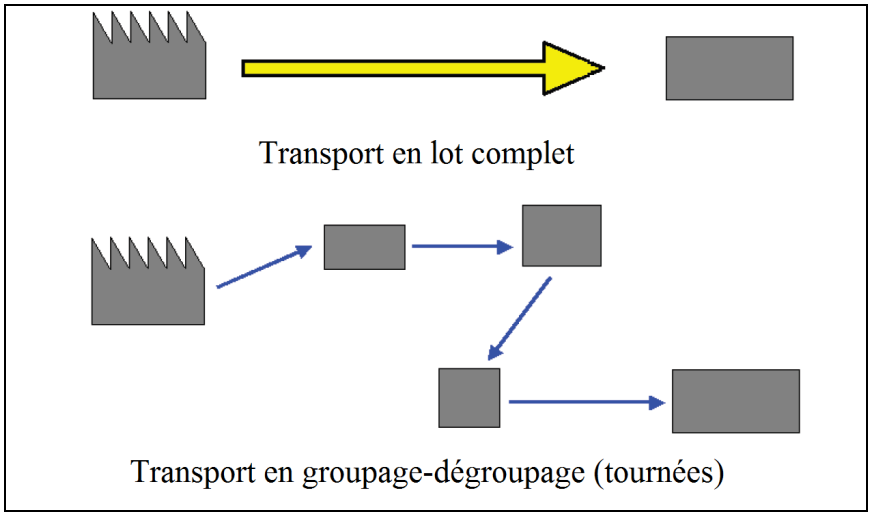


Figure 1. Principaux types d'usage du véhicule

Ce chapitre a comme objectif de définir les systèmes de transport multiniveaux, moins traités dans la littérature avec une vision d'ensemble (et donc de système) que les systèmes à un seul niveau.

Un système de transport multiniveaux peut être défini donc comme un système où une quantité de marchandises doit être livré depuis un point de départ (en général appelé dépôt) à une ou plusieurs destinations (client), non directement mais en passant pour une série de plates-formes intermédiaires. Les objectifs de ces systèmes sont d'assurer une livraison efficace et à moindre coût,

tout en respectant des objectifs de qualité (livraisons à temps) ou environnementaux (réduction de la congestion et des émissions de gaz à effet de serre). Le dépôt est défini par sa localisation. Les clients, par un nombre d'informations, en général liés à la livraison à effectuer. En premier lieu l'on trouve la localisation du client et les caractéristiques de l'établissement à livrer. Ensuite, la quantité de marchandise à livrer ainsi que sa nature. Enfin, les conditions de qualité et autres informations sur la livraison : période de la journée où la livraison va avoir lieu, unité de conditionnement (palet, caisse, colis, conteneur, etc.), mode de retrait de la marchandise, … Ces conditions peuvent être modélisées sous forme de contraintes (lorsque l'on considère qu'elles doivent impérativement être respectées, sans exception) ou de pénalités en cas de non-respect (lorsqu'une marge de tolérance est autorisée).

Les systèmes multi-niveaux sont courants en logistique, et ne se limitent pas au seul cas du transport. Quatre cas principaux de systèmes multiniveaux peuvent être identifiés

- **Les chaînes logistiques à dominante production**. Dans la plupart de chaînes logistiques à flux poussés (ou dans les stratégies de juste à temps), la production pilote toute la chaîne logistique. Il est donc nécessaire de donner une place privilégiée à cette production, en tenant compte des étapes amont et aval. Le système comporte plusieurs niveaux, er est multi-échelon par nature.
- **Les systèmes de distribution basés sur la gestion de stock**, où la gestion d'entrepôt domine la gestion du transport. Dans ces cas, un ou plusieurs entrepôts, où sont gérés les stocks, sont définis entre le producteur et le client final et au moins deux schémas de transport sont considérés. Dans ce contexte il est donc nécessaire de considérer les différents sous-systèmes de transport séparément, en se concentrant sur la gestion de stocks. Dans le cas de systèmes avec plusieurs niveaux de stockage, le système de gestion de stocks est en soi un système multi-échelon.
- **Les systèmes de transport multiniveaux à charge complète ou unique**, i.e. des systèmes où un ou plusieurs points de transbordement sont considérés mais toute la charge du véhicule est transférée directement dans un autre. Ceci est le cas du transport de conteneurs, les systèmes de transport routier articulés avec changement de tracteur ou le transport intermodal accompagné, entre autres.
- **Les systèmes de transport et de distribution avec cross-docking et/ou consolidation**. Comme dans l'antérieur, une ou plusieurs ruptures de charge peuvent être définies. Dans ce cas, le contenu des véhicules est déchargé, puis éventuellement groupé ou dégroupé pour être chargé dans d'autres moyens de transport.

Nous nous intéresserons par la suite à la quatrième catégorie. Dans un système de transport multi-niveaux de cette catégorie, nous pouvons distinguer N échaelons de transport. Chaque niveau k présente un nombre de plates-formes de niveau k, à l'exception su niveau 0 (où un ou plusieurs dépôts sont définis) et le niveau N (où les destinations sont les clients à livrer). Le système global de transport qui en découle a N niveaux :

- Le premier connecte les dépôts avec les plates-formes intermédiaires de premier niveau.
- Les N-2 intermédiaires connectent les différentes plates-formes intermédiaires par niveau.
- Le $N^{ième}$ niveau connecte les plates-formes intermédiaires de niveau N-1 aux clients.

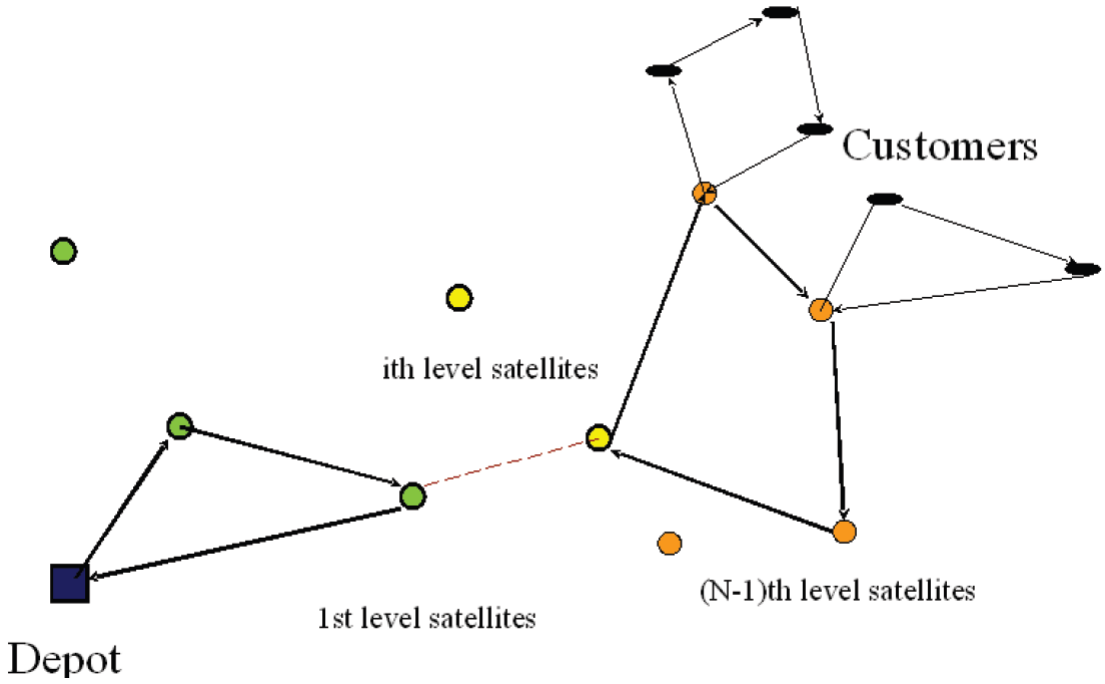


Figure 2. Exemple de système multui-niveaux de transport de marchandises

Ces plates-formes intermédiaires sont en general des paltes-foems de groupage-dégroupage. Ceraines vont héberger des fonctions de pur cross-docking (i.e., stransbordement de la marchandises sans que son conténant et/ou conténu soit altérée), d'autres vont être dédiées au groupage (consolidation) ou au dégroupage (distribution). Dans quelques cas, des services annexes (étiquetage, entreposage provisoire, reconditionnement, etc.) peuvent y avoir lieu.

Ces systèmes sont très souvent déployés dans des situations réelles, comme par exemple dans la distribution de colis (messagerie et messagerie express), le transport intermodal, les systèmes avancés de logistique urbaine, la grande distribution, le e-commerce et la distribution de la presse, entre autres (voir par exemple Jacobsen et Madsen, 1980 ; Crainic et al., 2004 ; Deflorio et al., 2005 pour des exemples de systèmes de ce type).

Au niveau scientifique, nous observons une vaste littérature dans le design et la modélisation des chaînes logistiques (Beamon, 1999 ; Dullaert et al., 2006). Dans l'optimisation du transport, des problèmes de localisation de plates-formes et des problèmes de localisation-routage peuvent être proches du problème traité (Nagy et Salhi, 2007).

4. Le problème de tournées de véhicules

L'optimisation des tournées est un problème très populaire (Toth et Vigo, 2002). La version de base du problème est le bien connu problème du voyageur de commerce (Traveling Salesman Problem, ou TSP, en anglais). LE problème a comme objectif de minimiser le coût de réaliser la visite à un groupe de clients avec une seule tournée depuis un seul point de départ (qui est le même point final de la tournée). Lorsque plusieurs tournées, sans contraintes de capacité, sont envisagées, le problème s'appelle Problème du voyageur de commerce multiple (multiple TSP ou multi-TSP en anglais). Ce problème est le même que le TSP simple mais, au lieu de nécessiter une seule tournée, les clients peuvent être visités en utilisant plusieurs tournées.

Lorsque les véhicules ont une capacité, on est dans le bien connu problème de tournées de véhicules (PTV), en anglais Vehicle Routing Problem (VRP). A la configuration du TSP multiple, le VRP ajoute la contrainte que les véhicules ont une capacité à ne pas dépasser, et donc tient compte de la charge du véhicule. Ce problème s'est décliné en plusieurs variantes :

- Lorsque le temps d'arrivé au client est une condition de qualité de service, il est important de l'inclure dans le problème d'optimisation. Le PTV avec fenêtres temporelles (VRP with Time Windows) lorsque chaque destination a une fenêtre de temps défini dans laquelle le véhicule doit arriver. Cette fenêtre peut être définie comme une contrainte forte à absolument respecter (hard time windows), ou comme une pénalité incluse dans la fonction de coût à optimiser (soft time windows).
- Lorsque des configurations de réseau différentes au problème initial sont envisagées, nous pouvons définir deux grandes catégories de variantes. La première est celle des PTV à dépôts multiples (multidepot VRP), où la marchandise peut partir de plusieurs origines possibles, sans privilégier l'un d'entre eux a priori. Le PTV avec satellites de remplissage (VRP with satellite facilities) apparait quand les véhicules partent et doivent rentrer à un unique dépôt mais peuvent, pendant leurs tournées s'approvisionner sur des entrepôts satellitaires de remplissage. Dans les deux cas, la marchandise n'est pas affecté à un dépôt ou satellite et on ne tient pas compte des questions liées à l'approvisionnement des dépôts/entrepôts ni aux questions de préparation de commandes.
- Lorsque les véhicules ont une autonomie à respecter (notamment dans le cas de véhicules électriques ou de limitations liées au temps de conduite), deux possibilités peuvent être envisagées. Le PTV-distance (distance-constrained VRP) inclut des contraintes de limitation de la distance totale parcourue par des véhicules. Le PTV-temps (time-constrained VRP) le fait de façon analogue avec le temps total d'utilisation du véhicule.
- Finalement, lorsque à destination, la marchandise peut être livrée et/ou retirée, nous pouvons représenter le problème comme un PTV avec livraisons et enlèvements (VRP with pickup and/or deliveries). Si le véhicule doit en premier livrer tous les clients puis les revisiter pour ramasser de la marchandise, nous sommes face à un (PTV avec enlèvement au retour (VRP with backhauls). Si à chaque destination, la livraison et l'enlèvement se font simultanément, on est dans un PTV avec livraisons et enlèvements simultanés (VRP with simultaneous pickups and deliveries), tandis que si les enlèvements peuvent n'avoir lieu au même temps que les livraisons (et donc le véhicule peut visiter une même destination deux fois dans une tournée pour effectuer respectivement une livraison et un enlèvement) on est dans un PTV avec livraisons et enlèvements mixtes (VRP with mixed pickups and deliveries).

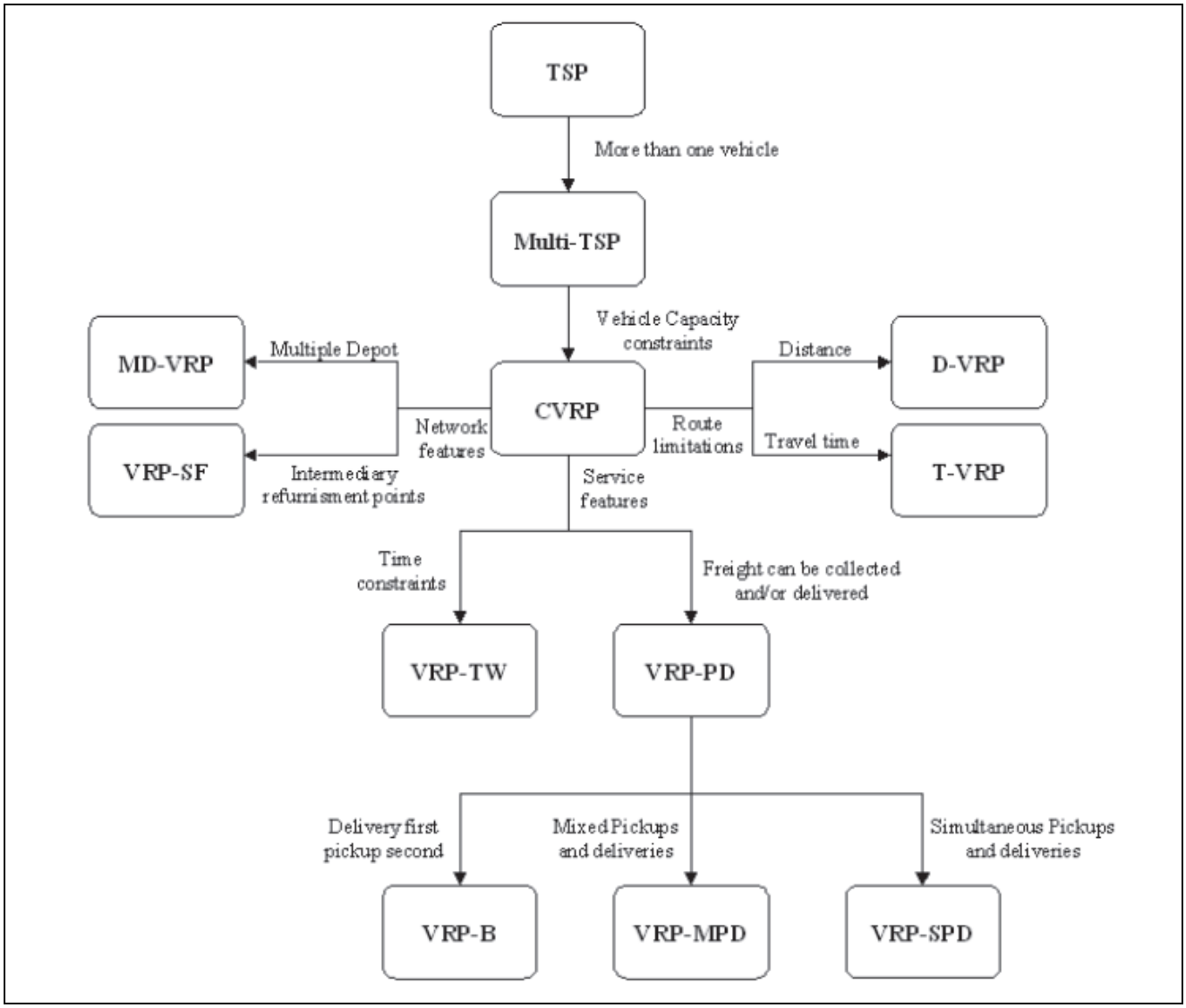


Figure 3. Les principales variantes du PTV (VRP en anglais)

Dans toutes ses approches, et quelles que soient les méthodes utilisées, le système de transport représenté n'a qu'un niveau. Il est donc important de définir le problème d'optimisation à plusieurs niveaux.

5. Le PTV multiniveaux (multiechelon VRP) et le PTV à deux niveaux (2E-CVRP)

Ces deux chapitres présentent le problème d'optimisation, en définissant leurs variables et leur principales caractéristiques. Considérons un système de distribution à N échelons, avec une seule origine (le dépôt). On définit un graph G qui représente le système de transport. Ce sytème est donc composé de sommets et d'arcs. Trois types de sommets sont définis :

- Le dépôt ou sommet de niveau 0.
- Les satellites de niveau *e*, pour chaque niveau $e = \{1, \ldots, N-1\}$.
- Les clients ou sommets de niveau N.

Les arcs sont associés aux sommets en les reliant comme suit. Un arc de niveau e relie soit un sommet de niveau *e*-1 à un sommet de niveaun, soit deux sommets de niveau *e*.
Les clients font de demandes de transport, définies par une quantité à livrer. Le dépôt est supposé avoir la quantité de marchandise nécessaire à satisfaire tous les clients. Pour livrer chaque sommet de niveau *e*, une flotte de véhicules, capacités (i.e. ayant une capacité maximale à ne pas dépasser) sont mis à disposition. Chaque niveau a sa flotte (tous les véhicules de même niveau ont les mêmes caractéristiques, mais les flottes varient en fonction du niveau, en général plus le niveau est bas plus les véhicules sont grands). Chaque client doit être livré une fois, mais les plates-formes intermédiaires, quel que soit le niveau, peuvent être livrées par un ou plusieurs véhicules, ou même ne pas être livrées si ceci est jugé peu rentable).

Le problème d'optimisation qui en découle vise à minimiser la somme des coûts de toutes les tournées plus ceux liés au transbordement des marchandises et éventuellement l'activation de la plate-forme ou les plates-formes utilisées. Ce problème dérive du VRP en l'étendant à plusieurs niveaux. Or le problème de base e VRP mais aussi le TSP) sont dits NP-difficiles (en d'autres mots, la combinatoire derrière le problème ne permet pas de trouver l'optimum du système et de le prouver en un temps qui n'explose pas lorsque le nombre de sommets du graphe augmente.

Pour simplifier les calculs et proposer des résultats, ainsi que des modèles, la version la plus simple du problème a été choisie. Celle-ci comporte deux niveaux, donc trois types de sommets (un dépôt, des plates-formes intermédiaires, appelées satellites, et des clients), deux types d'arcs (définis comme dans le cas général à N niveaux) et deux flottes de véhicules : ceux du premier niveau sont en général plus grands que ceux du deuxième niveau.

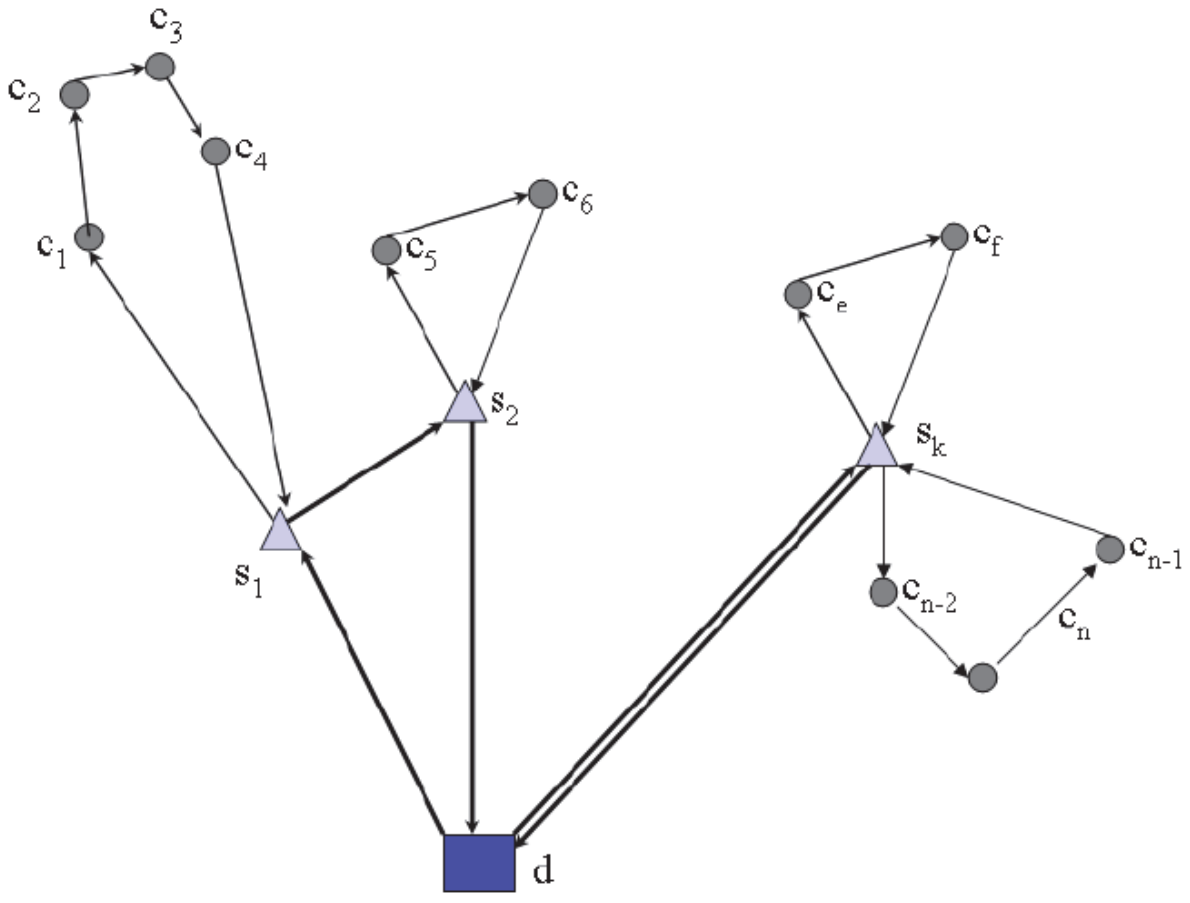


Figure 4. Exemple de PTV à deux niveaux

Afin de modéliser le problème, les différentes apporches pour le VRP classique ont été explorées. Compte tenu de ceci, une approcha “arc” a été choisie. En effet, les coûts unitaires qui définiront la fonction à minimiser sont les trajets entre deux sommets du graphe. Deuux modèles sont proposés:

Un modèle issu du croissement de la modélisation des flux aves les modèles classiques du vRP, où cinq types de variables sont définies: trajets de premier niveau, trajets de deuxième niveau, quantité de marchandises transporté dans un trajet de premier niveau, quantité de marchandises transporté dans un trajet de premier niveau, et variable binaire définissant si le client considéré est affecté au satellite considéré ou non.

Un modèle issu du multi-TSP avec une adaptation importante, où quatre types de variables sont définies: trajets de premier niveau par véhicule, trajets de deuxième niveau par véhicule, variable binaire définissant si le client considéré est affecté au véhicule considéré ou non, et variable binaire définissant si le client considéré est affecté au satellite considéré ou non.

Le détail de ces modèles n’a pas été reporté ici. Néanmoins, le modèle flux est synthétisé dans l’un des trois articles joints (Gonzalez-Feliu, 2012, référencé dans le paragraphe valorisation). Il faut dire que le premier modèle permet d’utiliser directement un logiciel commercial pour le résoudre, tandis que le deuxième nécessite d’une adaptation qui augmente considérablement les temps de calcul. Pour ceci,seul le modèle flux est testé et analysé.

Chapitres 6 et 7 : Résultats d’application du modèle retenu et pistes pour la résolution du PTV à deux niveaux

Afin de tester le modèle, il a été nécessaire de construire des jeux de test à ce propos, la litérature ne comptant pas d’instances « standard pour ce problème. Quatre jeux de données ont été proposés :

- Un premier ayant des cas avec un dépôt, 2 satellites et 12 clients, en partant d’une instance de base du VRP et en répliquant 66 possibilités de localisation des satellites.
- Un deuxième avec 21 cas ayant un dépôt central, de 2 à 4 satellites choisis aléatoirement et de 21 à 50 clients (transport interurbain)..
- Un troisième avec 18 cas ayant un dépôt périphérique, 2 satellites aussi périphériques et de 21 à 50 clients.
- Un quatrième avec 54 cas ayant 1 dépôt périphérique, de 2 à 5 satellites (choisis de façon plus ciblée) et 50 clients.

Une première analyse a été effectuée sur les cas du groupe 1. Pour ceux-ci un indicateur d’accessibilité a été calculé pour le deuxième niveau, ainsi que la distance moyenne des satellites par rapport au dépôt a été estimée. Cette analyse a visé à identifier des liens entre accéssibilité et difficulté à optimiser. Pour ceci, les résultats obtenus avec le modèle (tous des optimums de système) ont été comparés à l’optimum résultant pour livrer le système avec un seul échelon (donc sans points intermédiaires). Des valeurs limites pour définir trois classes d’accéssibilité et de distance (basse, moyenne, haute) ont été aussi définis. Les résultats snot reportés dans le tableau suivant :

Tableau 2. Résultats de l'analyse d'accessibilité (le premier chiffre représente le nombre de cas de la catégorie dont l'on gagne à utiliser un schéma à deux niveaux, le deuxième le nombre de cas où l'on perd, en coût total)

Mean accessibility			
H	9/0	5/2	0/6
M	10/3	3/0	1/4
L	9/5	2/6	0/1
	L	M	H

Mean transportation cost

Le tableau montre que seule l'accessibilité (et donc la prise en compte d'un seul niveau) ne suffit pas à comprendre quand on gagne à utiliser un système à deux niveaux. Pour ceci, il faut coupler accessibilité (deuxième niveau) avec distance moyenne (premier niveau). Nous observons que lorsque la distance à parcourir pour aller du dépôt aux satellites est trop grande, notamment si les clients se trouvent entre les deux, il n'est pas convenable d'utiliser des systèmes multi-niveaux.

Après ceci, des analyses sur des cas plus grands (groupes de cas 2 à 4) ont été réalisées pour étudier les limites du modèle. Le modèle en soi permet de resoudre des instances jusqu'à 22 clients, et en se servant de procédures d'accéleration des calculs (en rajoutant des contraintes qui ne vont aps modifier le problème mais éliminer des solutions non optimales) on arrive à réssoudre des problèmes jusqu'à 32 clients presque à l'optimalité. Dans une configuration réaliste, ces dimensions restent petites, et donc il serait nécessaire d'utiliser d'autres méthodes (dites heuristiques ou approximées).

Dans une approche théorique, une méthode visant à générer des tournées entières a été proposée. Cette méthode se base sur une autre modélisation, qui vise à définir comme unité la tournée et pas le simple trajet, comme unité de base. Pour ceci, il faut définir et donc générer les tournées. Une méthode qui relie explicitement les clients aux tournées des deux niveaux a été présentée, ainsi qu'une méthode de resolution. Cette méthode a été appliquée mais, compte tenu de la combinatoire, les résultats n'ont aps été jugé satisfaisants. Ceci est dû au grand nombre de possibilités dans la génériond es tournées qui fait que el modèle peine à identifier les bonnes solutions. Ce modèle n'est donc pas pertinent et mérite d'être revu. Comte tenu du processus (obligation de finir la thèse à la fin de la troisième année pour une soutenance dans les mois suivants), ce travail n'a pas été poursuivi mais des pistes de réflexion sur comment s'y prendre pour dépasser ces limites ont été proposées.

Conclusion

Cette thèse a été l'une des premières dans la modélisation de la logistique urbaine. De plus, elle part de la définition de « solutiond e logistique urbaine » pour proposer une approche théorique de la consolidation et des schémas distributifs multiniveaux pour les marchandises. Un nouveau problème d'optimisation a été proposé et testé, sur des cas urbains et interurbains. Une deuxième approche de résolution a été aussi proposée, mais jugé peu pertinente.

Le travail pourra être approfondi par la suite (e l'a déjà été en partie) sur la formalisation mathématique du problème général ou sur les aspects pratiques (voir paragraphe sur al valorisation de la thèse). Les liens entre ces aspects théoriques et la théorie du remplissage (bundling theory) de Kreutzberger méritent aussi ample réflexion. En ce qui concerne les méthodes de résolution, il est important de développer des méthodes faciles à expliquer et à comprendre, rapides et qui donnent une bonne solution même si celle-ci n'est pas l'optimum. A ce propos, plusieurs travaux ont déjà été initiés par différents chercheurs.

Si bien il reste encore beaucoup de chemin à parcourir, cette thèse a permis de poser les bases de la modélisation et de l'optimisation de tournées multiniveaux et a lancé un sujet de recheche qui commence à être prolifique (plus de 50 articles, chapitres d'ouvrage ou communications entre 2008 et 2013).

Valorisation de la thèse

La thèse (à des niveaux d'avancement différent) a été présentée dans plusieurs conférences nationales italienens (AIRO 2006 et 2007) et internationales (AIROWinter 2007, Cortina-Italie, J-OPT 2007, Montréal, EURO 2007, Prague). De plus, trois séminaires ont été issus du travail de la thèse (Turin, avril 2006 ; Ancona, Janvier 2007 ; Lyon, mai 2008). Quatre publications postérieurs à la thèse portant principalement sur ces travaux ont été réalisées. Son conténu porte principalement sur des éléments méthodologiques et de revue de littérature de la thèse, en incluant des avancements ultérieurs, souvent à demande des relecteurs (Gonzalez-Feliu, 2011, 2012a, b, 2013).

De plus, le contenu du chapitre 1 a permis d'alimenter partiellement deux autres articles. Plus précisément, des notions et conclusions de ce chapitre ont servi à introduire les deux cas d'étude présentés, tous les deux traités synthétiquement dans la thèse, et approfondis respectivement dans Gonzalez-Feliu et Morana (2010) et Ville et al. (2013).

Références

[1] B. M. Beamon, Supply chain design and analysis: Models and methods, *International Journal of Production Economics* 55 (3) (1998) 281–294.

[2] T. Crainic, G. Laporte, Planning models for freight transportation, *European Journal of Operational Research* 97 (1997) 409–438.

[3] T. Crainic, N. Ricciardi, G. Storchi, Advanced freight transportation systems for congested urban areas, *Transportation Research part C* 12 (2004) 119–137.

[4] F. Deflorio, B. Dalla Chiara, J. Gonzalez-Feliu, Autostrada ferroviaria e trasporto stradale lungo la direttrice del frejus: analisi di scenari mediante un modello di rete, *Ingegneria Ferroviaria* 10.

[5] J. Desrosiers, F.Soumis, M. Desrochers, Routing with time windows by column generation, *Networks* 14 (1984) 545–565.

[6] J. Gonzalez-Feliu (2008), *Models and Methods for the City Logistics – The Two-echelon Capacitated Vehicle Routing Problem*. PhD. Thesis. Politecnico di Torino, Turin, Italy.

[7] J. Gonzalez-Feliu (2011), Two-echelon transportation optimisation: unifying concepts via a systematic review, *Working Papers on Operations Management*, vol. 2, n. 1, pp. 18-30.

[8] J. Gonzalez-Feliu (2012), Freight distribution systems with cross-docking: a multidisciplinary analysis, *Journal of the Transportation Research Forum*, vol. 51, n. 1, pp. 93-109.

[9] J. Gonzalez-Feliu (2012), Cost optimisation in freight distribution with cross-docking: N-echelon location routing problem, *Promet – Traffic & Transportation*, vol. 24, n. 2, pp. 143-149.

[10] J. Gonzalez-Feliu (2013), Multi-Stage LTL Transport Systems in Supply Chain Management. In Cheung, J., Song H. (eds.), *Logistics: Perspectives, Approaches and Challenges*, Nova Science Publishers, New York, pp. 65-86.
[11] J. Gonzalez-Feliu, J. Morana (2010), Are City Logistics Solutions Sustainable? The Cityporto case. *TeMA. Journal of Land Use, Mobility and Environment*, vol. 3, n. 2, pp. 55-64.
[12] G. Nagy, S. Salhi, Location routing: Issues, models and methods, European Journal of Operational Research 177 (2007) 649–672.
[13] W. Ruske, City logistics-solutions for urban commercial transport by cooperative operations management, In: OECD Seminar on Advanced Road Transport Technologies, Omiya, Japan.
[14] E. Taniguchi, R. Thompson, T. Yamada, J. van Duin, *City Logistics: Network Modeling and Intelligent Transport Systems*, Pergamon, Amsterdam, 2001.
[15] P. Toth, D. Vigo, An overview of vehicle routing problem, in: P. Toth, D. Vigo (Eds.), *The Vehicle Routing Problem*, Vol. 9 of SIAM Monographs on Discrete Mathematics and Applications, 2002 1–51.
[16] S. Ville, J. Gonzalez-Feliu, L. Dablanc,(2013), The limits of public policy intervention in urban logistics: Lessons from Vicenza (Italy), *European Planning Studies*, vol. 21, n. 10, pp. 1528-1541.