

PLANIFICATION STRATEGIQUE POUR LA LOGISTIQUE URBAINE : L'APPORT DE LA RECHERCHE OPERATIONNELLE

Olivier GUYON¹, Nabil ABSI², Daniel BOUDOUIN³ & Dominique FEILLET⁴

Résumé : Cet article cherche à évaluer comment les outils de la recherche opérationnelle peuvent aider à la prise de décision stratégique en logistique urbaine. Aussi bien les collectivités locales que les transporteurs ont besoin de définir de nouveaux schémas d'organisation logistique dédiés aux agglomérations. Nous rappelons dans un premier temps ce qu'est la logistique urbaine et introduisons les Espaces Logistiques Urbains. Nous décrivons ensuite deux modèles de recherche opérationnelle, le problème de conception de réseau (*network design problem*) et le problème de localisation de sites (*facility location problem*), à même de répondre à de nombreux questionnements stratégiques en logistique. Nous donnons des exemples où ces modèles ont été déclinés pour la logistique urbaine. Nous concluons enfin par un regard critique sur ces modèles et la nécessaire pluridisciplinarité pour traiter des enjeux stratégiques de la logistique urbaine.

Mots-clés : Logistique urbaine, City logistics, Transport de Marchandises en Ville, Recherche opérationnelle

1. Introduction

La circulation des marchandises est une donnée importante dans l'économie des villes et dans la qualité de vie de ses habitants (particuliers et professionnels). Le fonctionnement d'une ville implique en effet mécaniquement des échanges de marchandises et le volume de ces derniers est reconnu comme étant un bon indicateur de la dynamique des zones urbaines.

¹ Dans la période où cette recherche a été effectuée, O. Guyon était chercheur post-doctoral à l'Ecole des Mines de Saint-Etienne, CMP Georges Charpak, 13541 Gardanne, France

² Chargé de recherche, Ecole des Mines de Saint-Etienne, CMP Georges Charpak, 13541 Gardanne, France, absi@emse.fr

³ Chercheur, Jonction, CRET-LOG, 13625 Aix en Provence, France, boudouin@jonction.fr

⁴ Professeur, Ecole des Mines de Saint-Etienne, CMP Georges Charpak, 13541 Gardanne, France, feillet@emse.fr

Ces déplacements engendrent malheureusement des conditions de circulation qui se dégradent sans cesse dans des villes de plus en plus polluées et congestionnées. De nouveaux schémas logistiques, respectueux de l'environnement, doivent donc être réinventés pour mieux coller au mode de fonctionnement des agglomérations. C'est dans cette optique qu'est étudiée depuis quelques années une nouvelle problématique : la logistique urbaine (*city logistics*).

Au milieu des années 1990, devant les nouveaux problèmes de distribution de marchandises auxquels elles se trouvaient confrontées, les collectivités locales ont fait appel au monde de la Recherche, et plus spécifiquement aux chercheurs spécialisés en économie du transport ou en sciences de gestion, pour fournir des diagnostics et proposer des solutions dédiées (Routhier, 2002). Un nombre important d'expérimentations ont alors vu le jour à travers le monde (Geroliminis et Daganzo, 2005). Elles ont malheureusement souvent été menées de manière indépendante, sans qu'un schéma applicatif générique n'ait pour le moment vu le jour. Le constat actuel porte alors sur la réelle nécessité d'établir une démarche globale, pour la logistique urbaine, avec évaluation a priori et a posteriori des résultats (Delaître et alii, 2007).

En parallèle de ces expérimentations sur le terrain, la recherche opérationnelle commence elle aussi à s'intéresser à la logistique urbaine. Cette communauté, qui propose des modèles conceptuels pour analyser des situations complexes et permet aux décideurs de faire les choix les plus efficaces, est en effet capable de proposer des outils d'aide à la décision pour l'organisation de la distribution urbaine. De nouveaux problèmes académiques, souvent basés sur des modèles classiques bien connus, ont commencé à être étudiés. Toutefois, ces problèmes s'avèrent souvent éloignés des préoccupations concrètes des différents acteurs de la logistique urbaine, et donc peu applicables.

Il nous paraît clair qu'une collaboration entre les différentes communautés constituerait une force évidente pour résoudre les nouveaux problèmes liés à la logistique urbaine. D'un côté, l'expertise-métier et la remontée d'informations du terrain sont nécessaires pour la définition et l'évaluation de nouveaux schémas logistiques adaptés innovants. D'un autre côté, la recherche opérationnelle peut fournir des outils pour aider à l'optimisation a priori de la mise en place de tels schémas.

A notre connaissance, les travaux collaboratifs sont encore rares. Nous nous l'expliquons par un manque de connaissance réciproque de la nature des problèmes et des solutions proposées par chacune de ces communautés. Nous entendons alors contribuer à leur rapprochement en identifiant en quoi les outils de la recherche opérationnelle peuvent apporter des réponses à des questions soulevées par la logistique urbaine.

Afin de limiter le spectre de l'étude, nous ne couvrons que les problèmes dits stratégiques, c'est-à-dire liés à des décisions sur le long terme, typiquement relatives au dimensionnement/positionnement de structures logistiques et aux stratégies de distribution. Ce travail fait suite au projet PLUME⁵ qui visait à modéliser la problématique du positionnement de plateformes de distribution pour la desserte urbaine.

Le plan de cet article est le suivant. Nous rappelons tout d'abord les concepts et les enjeux de la logistique urbaine, en insistant particulièrement sur ce qui la différencie de la

⁵ Projet réalisé en partenariat avec SOGARIS et le cluster PACA Logistique dans le cadre de la convention de subvention N°09 MT CV 39 du Ministère de l'Ecologie, de l'Energie, du Développement durable et de la Mer en charge des Technologies vertes et des Négociations sur le climat (PREDIT 4)

logistique de distribution classique et sur les équipements mis en jeu (section 2). Nous introduisons ensuite, dans la section 3, deux modèles de recherche opérationnelle génériques importants pour la planification stratégique de la distribution : le problème de conception de réseau (*network design problem*) et le problème de localisation de sites (*facility location problem*). Ces deux modèles, étudiés dans de très nombreuses variantes, constituent le socle de tout modèle de recherche opérationnelle pouvant adresser la logistique urbaine (à un niveau stratégique). La présentation est ici volontairement didactique afin de bien faire ressortir la structure de ces deux modèles pour des non-spécialistes. La section suivante liste quelques études où ces deux modèles sont déclinés pour traiter des cas relatifs au transport de marchandises en ville (section 4). L'article se poursuit par une discussion sur les opportunités offertes par les outils de la recherche opérationnelle, mais aussi leurs limites et les freins à lever pour capturer au mieux les spécificités de la logistique urbaine (section 5).

2. Schémas de distribution en logistique urbaine

2.1. Définitions et contexte

La logistique urbaine est le *procédé par lequel on optimise les activités de logistique et de transport des compagnies privées avec l'aide de systèmes d'information avancés pour la gestion du trafic, de sa congestion, de la sécurité et des ressources d'énergie dans les agglomérations, à l'intérieur d'une économie de marché* (Papaux, 2006). Elle considère ainsi, sous plusieurs critères d'évaluation, le Transport de Marchandises en Ville sur l'ensemble de sa chaîne logistique, depuis le producteur jusqu'au client en passant par des zones de stockage/entreposage/dégrouper éventuelles. Le TMV se constitue de trois composantes :

- les flux relatifs aux établissements du secteur privé
- les déplacements effectués par les particuliers pour s'approvisionner
- les flux annexes dus aux autres activités (déchetteries, services publics, déménagements, livraisons à domicile, services postaux, hôpitaux)

Le TMV génère une part importante des flux motorisés en ville. En France, 13 à 20% des déplacements dans une agglomération et 25% d'occupation de la voirie urbaine sont générés par le TMV (Dufour et alii, 2002). Ces déplacements sont nécessaires à la dynamique des villes mais ne vont pas sans quelques désagréments (Delaitre et alii, 2007).

Au niveau fonctionnel, les voiries urbaines des grandes agglomérations sont de plus en plus congestionnées. Les véhicules dédiés au TMV stationnent sur des emplacements illicites, et donc gênants pour la circulation, dans 60% à 80% des cas (Dufour et alii, 2002).

Au niveau économique, les coûts induits, aussi bien au niveau des infrastructures que des coûts de desserte, par la circulation de marchandises en ville sont des charges très importantes. La livraison du dernier kilomètre représente en effet 20% du coût total de la chaîne de distribution (Interface Transport et alii, 2009).

Au niveau environnemental et sociétal, le transport de biens dans les agglomérations est responsable d'une part importante de la pollution atmosphérique et sonore subie par les citoyens. A Tokyo, 77% des émissions en oxyde d'azote (NO) sont dues au transport de marchandises (Organisation for Economic Co-operation and Development, 2003).

Bien que déjà élevée, la quantité de marchandises transportée en milieu urbain augmente régulièrement et augmentera à taux régulier (Crainic, 2008). Les grandes agglomérations se densifient très rapidement et très fortement : l'OCDE prévoit que la population urbaine de ses pays membres atteigne 85% de sa population totale en 2020

(contre 50% en 1950 et 77% en 2000). Aussi, des nouveaux modes de fonctionnement des entreprises, telle la gestion des stocks en flux tendu, et de consommation des particuliers, comme l'explosion du e-commerce (Taniguchi et Kakimoto, 2003 ; Paché, 2010), favorisent une multiplication de ces transports.

Longtemps sous-estimés par rapport au transport de passagers, les enjeux liés à la distribution urbaine et les problèmes de transport qu'elle pose dans les agglomérations sont, depuis une vingtaine d'années, mieux considérés par les collectivités. Des initiatives et expérimentations menées partout dans le monde, notamment en France avec le Programme National Marchandises en Ville (Gérardin Conseil, 2007), en Europe avec les actions COST et le réseau BESTUFS ou au Japon, ont permis de mieux appréhender cette question de l'efficacité des systèmes de transport de marchandises dans les agglomérations. Cependant, le chemin vers une gestion optimale durable de la distribution urbaine est encore long (Dablanc, 2007).

2.2. *Spécificités de la distribution en logistique urbaine*

Jusqu'alors, la distribution de marchandises en ville n'était pas différenciée de la distribution classique. Traditionnellement, les transporteurs disposaient d'une plateforme en périphérie des grandes villes. Depuis celle-ci s'effectuaient des tournées quotidiennes où des camions, souvent volumineux, étaient utilisés pour permettre la livraison et le ramassage des marchandises dans un périmètre large non exclusivement urbain.

Cette organisation a longtemps été préférée car elle présentait la meilleure rentabilité. L'avantage principal d'un tel mode de distribution est que le coût du foncier est moins élevé en périphérie qu'en pleine ville. Pendant de nombreuses années, cet argument a prédominé car les autres coûts (notamment les coûts de distribution) n'étaient pas assez élevés pour justifier de la mise en place d'un autre mode de fonctionnement.

Cependant, ce système, efficace durant de nombreuses années, semble aujourd'hui être arrivé à échéance. L'émergence de nouveaux facteurs fait qu'il est désormais obligatoire pour les opérateurs de transport de trouver des schémas logistiques innovants dédiés aux villes.

Désormais, l'équilibre entre coûts fonciers et coûts de distribution a changé. La part de cette deuxième charge est désormais suffisamment importante pour repenser les implantations des plateformes logistiques et les stratégies de distribution. A notre sens, quatre facteurs expliquent l'augmentation de la part des coûts de distribution en ville.

Tout d'abord, on peut bien évidemment citer l'augmentation significative ces dernières années du prix de l'essence. A volume constant, il est nettement plus onéreux de transporter des marchandises actuellement qu'il ne l'était il y a encore seulement quelques années.

Aussi, l'apparition du e-commerce est une raison importante. Les besoins de livraison aux particuliers ont explosé avec l'avènement de ce nouveau mode de consommation. Les transporteurs doivent livrer de plus en plus de marchandises en ville (là où habite la majeure partie de la population) tout en s'adaptant aux exigences de cette clientèle. A l'inverse des professionnels, les particuliers veulent être livrés en dehors des heures de bureau. Dès lors, les transporteurs doivent multiplier le nombre de tournées intra-urbaines pour livrer davantage et dissocier au mieux tournées de particuliers et tournées de professionnels.

La congestion accrue des zones urbaines est également un facteur notable. Ce phénomène a deux conséquences directes : l'augmentation des temps de livraison et la plus grande incertitude sur les durées exactes des tournées. Il est en effet de plus en plus compliqué pour un camion venant de l'extérieur de la ville de pénétrer puis circuler en ville. Ces difficultés intrinsèques sont aussi renforcées par la multiplication des réglementations

contraignantes à destination des véhicules de livraison pour endiguer la congestion (horaires d'accès en ville, tonnage limité...).

Enfin, les transporteurs font désormais face à une évolution des mœurs de la société qui demande plus de considération pour les coûts environnementaux et sociétaux de la logistique (impact sur le changement climatique, pollution atmosphérique et visuelle, bruit, accidentologie, production d'énergie, congestion...). En pratique, il est très complexe de définir des métriques pour quantifier ces coûts. A ce sujet, des avancées politiques (Maibach et alii, 2008) et scientifiques (Henriot et alii, 2008 ; Quariguasi Frota Neto et alii, 2008 ; Patier et Routhier, 2009 ; González-Feliu et Morana, 2010) sont à noter. Cependant, le chemin à parcourir pour harmoniser les méthodes d'estimation du développement durable semble encore long (Gérardin Conseil, 2007).

La convergence de ces facteurs fait alors de la distribution en logistique urbaine une problématique spécifique où les acteurs-métier (expéditeurs/détenteurs de fret, transporteurs et élus) doivent innover. Ils doivent concevoir des organisations différentes des modes de distribution classiques actuellement utilisés et dont l'applicabilité et la rentabilité sont de moins en moins assurées. Depuis maintenant quelques années, de nouvelles solutions techniques dédiées ont été testées, regroupées sous le terme d'Espaces Logistiques Urbains (ELU).

2.3. *Les Espaces Logistiques Urbains*

Les Espaces Logistiques Urbains sont une réponse au besoin de retour au cœur des villes de plateformes physiques (de stockage, entreposage, dégroupage) (Boudouin, 2006). Les ELU servent de pilotes du système logistique urbain dans un environnement où le coût du foncier est particulièrement élevé et où les nuisances (sonores, visuelles) doivent être limitées. Ces installations participent à une organisation cohérente de la circulation des marchandises en ville fondée sur une répartition harmonieuse des lieux de rupture de charge dans l'espace (Paché, 2010). Elles contribuent à une meilleure gestion structurelle de la ville (dynamiser des zones denses, fluidifier la circulation), à des économies de gestion (limiter les coûts d'infrastructures et de transport) mais aussi à une amélioration de l'impact environnemental de la logistique urbaine (améliorer l'image du centre-ville, minimiser le nombre de véhicules, les émissions de polluants). On distingue cinq catégories d'ELU (résumés extraits de (Dufour et alii, 2002)):

- **Les Zones Logistiques Urbaines.** Les ZLU ont pour finalité de localiser les professionnels à proximité de leurs clients afin de limiter les mouvements de véhicules. Les gares ferrées, Marchés d'Intérêt National, hôtels logistiques, espaces spécialisés, sont des ZLU.
- **Les Centres de Distribution Urbaine.** Les CDU permettent de mutualiser les flux qui pénètrent ou sortent de la ville en les canalisant vers un site où sont groupées ou dégroupées les marchandises avant la distribution finale par un opérateur unique (public ou privé).
- **Les Points d'Accueil des Véhicules.** Les PAV sont destinés à la livraison d'envois de petite taille, ils offrent aux véhicules utilitaires la possibilité de stationner en un lieu gardienné, garanti libre d'accès et sécurisé, d'où le chauffeur-livreur rejoint à pied le lieu de destination.
- **Les Points d'Accueil des Marchandises.** Les PAM permettent de concentrer les envois à destination ou en provenance d'une zone difficile d'accès. Ces interfaces de

faible superficie se substituent au destinataire ou à l'expéditeur pour éviter le dernier mètre.

- Les **Boîtes Logistiques Urbaines**. Les BLU sont des interfaces qui permettent de relier le transporteur et le client sans que la présence d'une personne sur le lieu de transfert ne soit nécessaire, tels des sas, des casiers aménagés ou apportés, des automates...

Des expérimentations sur la mise en place d'espaces logistiques urbains ont vu le jour à travers le Monde. Pour ne donner que quelques exemples français, on peut citer Paris et Marseille pour les ZLU, Monaco et La Rochelle pour les CDU, Bordeaux pour les PAV, les quelques 3900 relais Kiala pour les PAM, la Poste (Cityssimo), Consignity et DHL (Packstation) pour les BLU, ou Géodis pour le dispositif Distripolis (Browne et alii, 2005).

Toutes ces tentatives prouvent bien l'intérêt de schémas logistiques innovants dédiés à la distribution urbaine. Les résultats de ces initiatives démontrent cependant également que, malgré leurs atouts organisationnels (Paché, 2010), de tels schémas sont difficiles à mettre en place. Le choix du type d'installation, leur localisation et bien d'autres paramètres doivent être pris en compte pour un fonctionnement pérenne. En effet, les projets expérimentaux menés jusqu'alors n'ont pas tous abouti à de francs succès. Force est de constater que nombre d'entre eux constituent aujourd'hui des demi-réussites, certains devant même leur survie à l'injection régulière de fonds publics (González-Feliu et Morana, 2010).

Face à ce constat, il apparaît clair que la recherche opérationnelle peut s'avérer d'une très grande utilité, que ce soit pour les collectivités ou bien les entreprises spécialisées en distribution urbaine. La recherche opérationnelle est en effet en mesure de développer des outils dédiés d'aide à la décision servant efficacement à la mise en place physique de solutions innovantes pour une meilleure organisation de l'outil logistique urbain des grandes agglomérations.

Dans la section suivante qui se veut volontairement didactique, nous présentons deux modèles pour la planification stratégique de la distribution très étudiés en recherche opérationnelle. Ces deux modèles génériques n'ont pas de lien direct avec la logistique urbaine et sont simplistes par rapport à la majorité des problèmes de planification stratégiques rencontrés par les industriels dans la gestion de leur chaîne logistique. Malgré tout, ils ont prouvé à de très nombreuses reprises leur capacité d'adaptation à des problématiques réelles et sont à la base des moteurs d'optimisation de nombreux outils du marché. Leur déclinaison dans la cadre de la logistique urbaine est l'objet de la section 4.

3. Deux modèles génériques pour la planification stratégique de la distribution

Deux problématiques génériques se dégagent lorsqu'on évoque la planification stratégique de la distribution : le problème de conception de réseau (*network design problem*) et le problème de localisation de sites (*facility location problem*). Ainsi, le *network design problem* s'intéresse d'un côté à définir la meilleure conception des réseaux de distribution alors que le *facility location problem* vise lui à optimiser la localisation des différentes infrastructures de la chaîne logistique à optimiser. Ces deux problématiques ont fait l'objet de très nombreux travaux en recherche opérationnelle. Pour l'essentiel, l'échelle géographique considérée est celle d'une région, d'un pays, voire internationale ou mondiale. La littérature est très riche en exemples pratiques où ces modèles ont été adaptés et appliqués avec succès pour la conception de schémas logistiques.

Nous définissons ici de manière didactique, à l'attention de non-spécialistes de la recherche opérationnelle, la version originelle de ces deux problèmes. La terminologie française n'étant pas clairement établie dans la plupart des cas, nous privilégions la terminologie anglo-saxonne.

3.1. Problème de conception de réseau (*network design problem*)

Le *network design problem* vise à concevoir un réseau optimal sur lequel des entités, appelons-les produits, seront transportées entre différents points. Conçu dans les années 1960 pour des problématiques de conception de réseaux de télécommunication, le panel d'application du *network design problem* couvre désormais la micro-informatique, les réseaux de transport (personne, énergie, eau...), la logistique ...

Dans le modèle générique, le *fixed cost network design problem* (Minoux, 1989), on considère un graphe $G = (N, A)$, avec N un ensemble de nœuds et A un ensemble d'arcs. On s'intéresse de plus à un ensemble de produits $p \in P$ à transporter sur le réseau ; une quantité q_p de chaque produit transitant depuis un nœud origine $o^p \in N$ vers un nœud destination $d^p \in N$. Le problème consiste alors à déterminer le sous-ensemble d'arcs de A qui assure le transit de l'ensemble des produits de P au moindre coût. Le coût d'une solution se caractérise par la somme des coûts fixes de sélection des arcs (chaque arc de A a un coût de conception) et des coûts de transport, dits variables (chaque arc de A a un coût de transport selon le produit $p \in P$ en transit).

La Figure 1 illustre une instance d'un *fixed cost network design problem*. Dans cet exemple, volontairement très réduit, on s'intéresse à un unique produit p_1 et à un graphe G composé de 4 nœuds et 5 arcs. 7 unités de p_1 doivent transiter depuis le nœud 1 vers le nœud 4. La solution optimale de cette instance consiste à faire circuler les 7 unités de p_1 sur les arcs (1,2), (2,3) et (3,4). On obtient ainsi une solution de coût 133 correspondant à la somme des coûts fixes de sélection des arcs ($20+5+10$) ajoutée à la somme des coûts de transport ($7 \times (2+2+10)$).

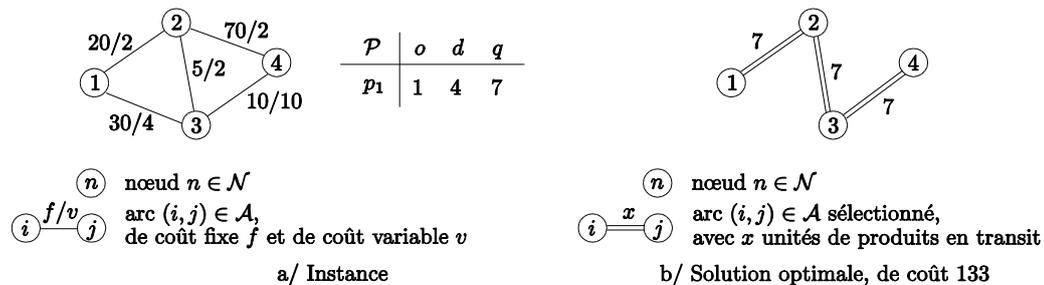


Figure 1: Exemple d'un *fixed cost network design problem*

Une multitude de variantes à ce modèle de base existent. Toutes exploitent ce modèle générique et y rattachent des contraintes additionnelles (plusieurs produits en transit, des capacités sur les arcs, des contraintes budgétaires, une distance maximale de transit d'un produit à respecter... et/ou des fonctions-objectif différentes). Des méthodes de résolution, souvent basées sur des modèles mathématiques, permettent alors d'obtenir des schémas optimaux ou quasi-optimaux.

3.2. Problème de localisation de sites (*Facility location problem*)

Le *facility location problem* fait référence à une classe de problèmes de localisation de sites dans un espace géographique prédéfini.

Sommairement, chaque variante du *facility location problem* considère en entrées deux

ensembles J et I . J est un ensemble de nœuds (appelés dépôts) représentant chacun une localisation possible pour l'implantation d'un maillon terminal de la chaîne logistique (typiquement une usine de fabrication et son entrepôt, ou une plateforme de distribution). I est un ensemble de nœuds symbolisant chacun un client $i \in I$ caractérisé par un niveau de demande q_i . Un des objectifs du problème consiste à déterminer un sous-ensemble de nœuds sur lesquels créer des dépôts. Chaque client est alors rattaché à un ou plusieurs dépôts qui le desservent.

Dans la version de base du problème, le *p-median problem*, on s'intéresse à localiser exactement p dépôts puis à rattacher chaque client à l'un d'eux. L'objectif du problème consiste à minimiser la somme totale des distances, pondérées par les demandes, des clients à leur dépôt. Le *p-median problem* est NP-difficile (Kariv et Hakimi, 1979).

La Figure 2 décrit une instance de *p-median problem* avec 5 clients, 3 localisations et 2 dépôts à localiser. Dans la solution proposée, les clients ayant une demande respective égale à 100 et à 20 sont liés à un premier dépôt, alors que les clients dont la demande vaut respectivement 50, 15 et 10 sont connectés à l'autre localisation retenue.

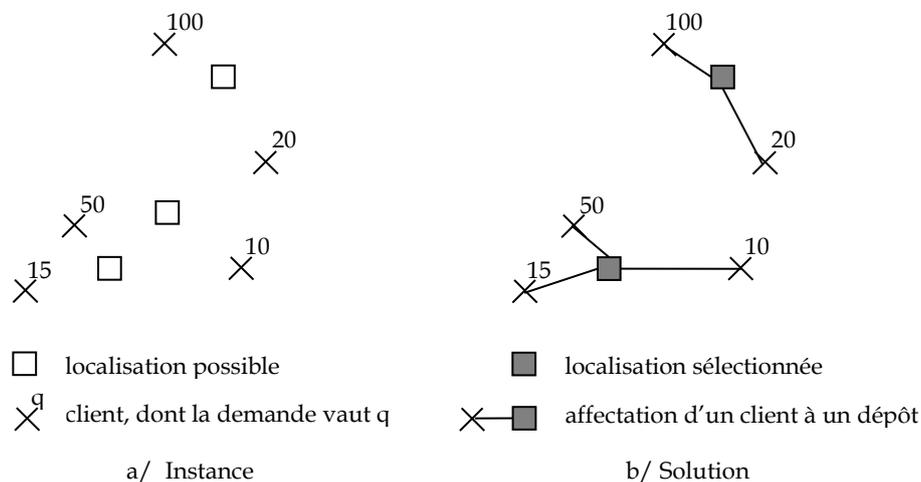


Figure 2 : Exemple d'un *p-median problem*

D'autres variantes du *facility location problem* existent (Klose et Drexl, 2005 ; Revelle et alii, 2008). Toutes se basent sur la modélisation générique et y ajoutent des contraintes ou objectifs supplémentaires (le nombre de dépôts à ouvrir est une variable à décider, les dépôts ont des capacités à respecter, plusieurs produits ou périodes sont considérés...).

4. Recherche opérationnelle et conception de schémas de logistique urbaine

Dans cette section nous donnons quelques exemples d'études qui relèvent des modèles de recherche opérationnelle présentés ci-dessus et qui adressent des problèmes de conception de schémas de logistique urbaine. Notre but n'est pas ici de faire un état de l'art exhaustif qui s'adresserait à des experts en recherche opérationnelle. Pour des états de l'art détaillés, nous nous référons à (Srivastava, 2007) pour des problématiques liées à la logistique verte (*green logistics*), à (Crainic et alii, 2009) pour celles concernant la logistique urbaine, et à (Farahania et alii, 2013) pour des problèmes liés à la conception de réseaux de transport urbains.

Comme indiqué précédemment, une première caractéristique de la logistique urbaine est la présence d'ELU, c'est-à-dire, de plateformes physiques à proximité du client final.

Deux questions stratégiques importantes sont de décider où localiser ces ELU et comment assurer la livraison des clients depuis ces derniers.

Pour commencer à y répondre, une problématique ressort tout particulièrement des travaux de la recherche opérationnelle appliquée à la logistique urbaine. Il s'agit du problème de tournées de véhicules à deux niveaux (*two-echelon vehicle routing problem*) (Jacobsen et Madsen, 1980 ; González-Feliu, 2008). Dans ce problème, des systèmes de logistique urbaine à deux niveaux sont étudiés. Au premier niveau, des marchandises sont transportées par des véhicules volumineux depuis un unique dépôt principal (généralement une plateforme située aux abords de l'agglomération considérée) vers un nombre fixé de structures de petite taille (situées au cœur de la ville) où elles sont transférées à des véhicules légers. Au second niveau, les véhicules légers effectuent des tournées pour livrer les marchandises aux clients auxquels elles sont destinées. Le dispositif Distripolis de la société Géodis est une illustration pratique du *two-echelon vehicle routing problem*. Dans ce système, des marchandises sont expédiées depuis une plateforme située en dehors de la ville (ZLU) vers des *bases logistiques urbaines écologiques* (assimilables à des PAM) d'où sont effectuées des tournées de livraison en véhicules légers vers les clients finaux.

Le projet PLUME⁶ adresse la problématique de localisation des ZLU pour la livraison en centre ville de Marseille (Absi et alii, 2010). Dans le cadre de ce projet, il a été développé un outil d'aide à la décision pour la localisation de ZLU dans une ville en tenant compte de contraintes organisationnelles (accès restreints à des zones, autonomie des véhicules...) et en optimisant différents objectifs (économique, environnemental et sociétal). Le problème traité révèle des similarités avec le *location routing problem* (modèle de localisation de sites considérant explicitement des tournées de distribution) mais intègre des contraintes particulières (livraison de zones au lieu de livrer des clients finaux).

Une organisation plus futuriste et mutualisée a été proposée dans le cadre du projet MODUM⁷. Celle-ci repose sur un ensemble de CDU à localiser dans la périphérie ou le centre de la ville permettant ainsi la livraison du dernier kilomètre. Ces CDU sont reliés par une navette (train, tram ou camion volumineux) permettant la circulation des marchandises entre eux. Des solutions mathématiques pour répondre aux questions de localisation de CDU et d'affectation des clients sont proposées (Gianessi et alii, 2013).

De manière générale, la plupart des problèmes en lien avec la logistique urbaine adressés par la communauté de la recherche opérationnelle étudient la rentabilité de la consolidation des marchandises à travers des CDU (Taniguchi et Thompson, 2002 ; Crainic et alii, 2009). L'essentiel des contributions porte sur la description du système de distribution et la modélisation sous forme de programme linéaire en nombres entiers. Cette attirance vers les CDU s'explique doublement. D'une part par l'attractivité de la mutualisation, qui semble une solution naturelle pour une meilleure consolidation des flux et organisation de la distribution. D'autre part car une prise de décision centralisée, qui est une des conséquences de la mise en place de CDU, correspond bien aux paradigmes habituels de la recherche opérationnelle. En effet, dans les modèles classiques, une fonction globale, dictant l'ensemble des décisions, doit être optimisée. Ce point est développé dans la section 5.

⁶ Projet PLUME : Plates-formes en centre-ville pour la Logistique Urbaine : étude sur la ville de Marseille

⁷ Projet MODUM : Mutualisation et Optimisation de la distribution Urbaine de Marchandises

5. Opportunités et limites de la recherche opérationnelle pour la logistique urbaine

Face à un nouveau problème, la méthodologie d'un projet de recherche opérationnelle se compose d'un ensemble d'étapes, globalement réalisées de manière séquentielle (même si des retours en arrière sont toujours nécessaires), tel qu'illustré dans la Figure 3.

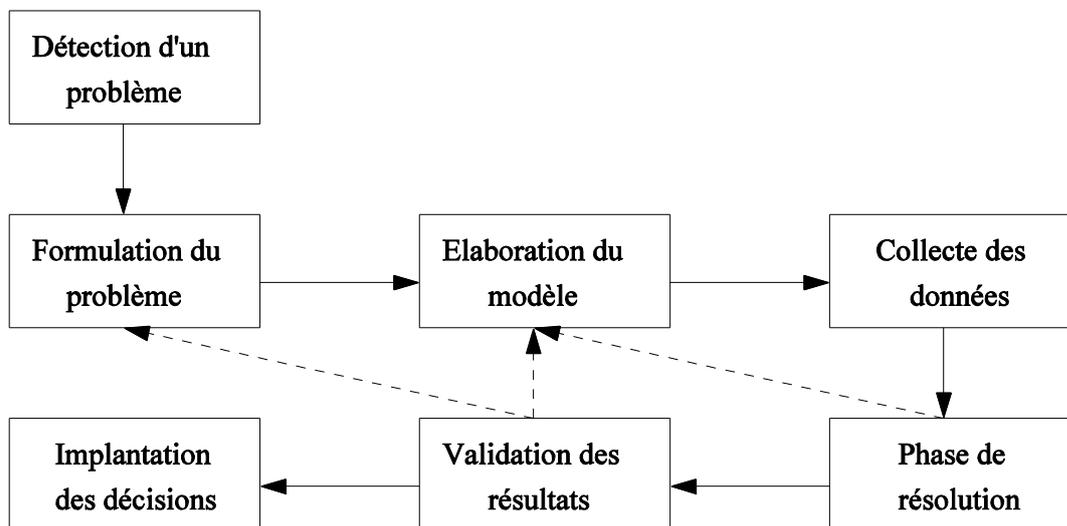


Figure 3 : Méthodologie de la recherche opérationnelle

Le cœur de l'expertise des spécialistes de la recherche opérationnelle concerne les étapes de modélisation (élaboration du modèle) et de résolution (phase de résolution). Les autres étapes nécessitent l'implication d'autres acteurs, ainsi qu'une forte coopération entre ces acteurs et les experts de recherche opérationnelle. Deux phases sont particulièrement critiques :

- Phase de formulation du problème. Il s'agit ici de définir les contours de la modélisation, à savoir, les indicateurs qui doivent être mis en avant, les contraintes qu'il faut intégrer, le degré de finesse vers lequel tendre... Il est alors indispensable d'être capable de comprendre de manière précise les enjeux de la problématique étudiée, les déterminants, les leviers sur lesquels agir. Il est tout aussi essentiel de mettre en relation les choix faits à ce stade et leur impact pour les phases suivantes, notamment la modélisation et la résolution.
- Phase de collecte des données. Il s'agit ici d'alimenter le modèle en données. De nouveau, il est essentiel d'anticiper sur cette phase lors de la formulation du problème. En effet, les résultats obtenus en fin d'étude ne pourront être crédibles que si les données initiales le sont elles-mêmes. A la question de la précision des valeurs affectées aux données, s'ajoute aussi la difficulté d'accéder à ces données : quelqu'un les détient-il ? qui ? la difficulté de rassembler l'ensemble des données peut-elle faire échec au projet ?

Décliné dans le cas de problèmes stratégiques pour la logistique urbaine, plusieurs difficultés importantes apparaissent liées à ces deux étapes. Ces difficultés sont présentées, classées par thème, ci-dessous. L'objet n'est pas ici de dire qu'il s'agit de points bloquants, rendant inutile l'utilisation de la recherche opérationnelle, mais bien au contraire de mieux définir ce que peut et ne peut pas (ou plus difficilement) faire la recherche opérationnelle, afin d'éviter les désillusions. Il est de plus essentiel de bien garder en tête que les résultats fournis par les modèles de recherche opérationnelle, et ceci est particulièrement vrai dans un

contexte stratégique, ne sont que des éléments parmi d'autres pour guider des décisions généralement très complexes et à très fort impact, et qu'il ne faut pas en attendre une vision exhaustive et complète.

Sur tous les thèmes développés ci-dessous, de nombreux auteurs ont proposés des solutions ponctuelles et ont parfois pu développer des outils d'aide à la décision performants (Munuzuri et alii, 2011) ; malgré tout, des solutions plus globales vers lesquelles la littérature convergerait restent à trouver.

5.1. *Modélisation de la demande*

Dans la ville, la demande en ramasse ou livraison est extrêmement dynamique. A un niveau stratégique, elle ne peut évidemment pas être modélisée en considérant explicitement chaque point de demande, d'une part du fait de la quantité de données qu'il y aurait à traiter, mais aussi et surtout car cette information ne se découvre qu'au plus quelques heures ou quelques jours à l'avance.

Il s'avère donc nécessaire d'agréger la demande en demande par secteur. Chaque secteur se verra ainsi associé un niveau de demande à satisfaire quotidiennement. Selon les besoins, il sera possible d'indicer par le temps le niveau de demande, de manière à traduire une évolution de la demande par secteur tout au long de l'horizon de planification considéré. De même, on pourra indicer la demande par type de produits, de manière à traduire d'éventuelles différences d'organisations ou différentes contraintes spécifiques aux produits.

Traditionnellement, dans les modèles de localisation ou de conception de réseaux, les données sont modélisées de manière déterministe. C'est une demande moyenne qui sera retenue pour chaque secteur en fonction d'historique ou de prévisions. Des scénarios d'augmentation ou de diminution de la demande pourront également être testés pour évaluer la robustesse du système. La modélisation de la demande sous forme stochastique est également possible, mais peut très fortement compliquer la phase de résolution.

5.2. *Modélisation du transport*

Un deuxième point concerne la modélisation de l'activité de transport proprement dite. Les trajets réalisés par les véhicules, sont évidemment au cœur de la logistique urbaine et se planifient à un niveau opérationnel, en fonction des besoins quotidiens. A un niveau stratégique, on ne peut donc en avoir qu'une vision agrégée et approximative. L'impact des décisions stratégiques (localisation des plateformes, type de véhicules utilisés) sur le transport doit malgré tout pouvoir être pris en compte.

Les modèles classiques de localisation (section 3.2) abordent cette question en se limitant à affecter les clients (qui seraient ici les secteurs à desservir dans la ville) aux plateformes de distribution. L'impact du transport est alors évalué à travers des coûts d'affectation et sous-entend une distribution sous forme d'aller-retour entre les plateformes et les clients.

Une deuxième approche, introduite plus récemment, donne lieu aux modèles dits de localisation-routage (*location-routing*) (Nagy et Salhi, 2007). Des tournées sont alors explicitement considérées dans la phase de distribution. Mais, sachant que la demande est agrégée en secteurs, ces tournées ne peuvent représenter des itinéraires détaillés mais seulement une séquence de secteurs à visiter. Des temps et coûts de service doivent alors typiquement être associés à la satisfaction de la demande d'un secteur. Egalement, des distances inter-secteurs doivent être introduites. La définition de ces données peut être très problématique.

Dans (Absi et alii, 2010), nous proposons, dans le contexte de la messagerie, une approche intermédiaire. Sachant qu'une tournée ne servira qu'un nombre très restreint de secteurs et que ces secteurs seront forcément proches, nous proposons de ne tenir compte que de coûts d'approche (plateforme vers secteur) et de retour (secteur vers plateforme) et de coûts internes aux secteurs. Des contraintes de compatibilité sont introduites pour interdire de combiner des secteurs éloignés dans une même tournée. Le double avantage de cette modélisation par rapport à celle de localisation - routage est de limiter l'introduction de données très difficiles à définir et de réduire la complexité de la résolution. Une limite de cette dernière approche est de ne pas associer d'horaires aux trajets d'approche et de retour, ni aux visites de secteurs.

5.3. Modélisation des critères à optimiser

La plupart des modèles de localisation ou de conception de réseaux cherchent à optimiser une fonction qui représente une valeur économique. La solution recherchée est alors le meilleur compromis entre des coûts liés aux équipements (réseau de distribution, plateformes...) et des coûts de transport. Dans le cas de la logistique urbaine, les critères environnementaux et sociétaux doivent nécessairement trouver leur place. Ceci amène naturellement à une approche multicritère, maintenant très classique en recherche opérationnelle (Ehrgott, 2005).

Malgré tout, la modélisation fine de critères environnementaux reste encore à explorer. Il est aisé de modéliser des nombres de particules émises comme étant le produit entre des distances parcourues et des particules émises au kilomètre, mais cela ne reflète que très partiellement la réalité, d'autant plus dans un contexte où les véhicules subissent des changements répétés de vitesse et de nombreux arrêts. Plusieurs études sont en cours sur cette question (Zanni et Bristow, 2010 ; Bektas et Laporte, 2011).

La modélisation de critères sociétaux est encore plus problématique pour un modèle de recherche opérationnelle car une traduction quantitative de critères par nature qualitatifs, est nécessaire.

5.4. Modélisation des jeux d'acteurs

Une des difficultés du contexte urbain est d'impliquer une multitude d'acteurs. En simplifiant, on peut dégager deux catégories principales d'acteurs concernés par la conception de schémas de distribution en ville : les entreprises impliquées (entreprises de transport, aménageurs logistiques...) et les collectivités locales (qui reflètent également les attentes des clients finaux - détaillants, habitants...).

Dans un contexte stratégique, le but des modèles de recherche opérationnelle est d'aider à la prise de décision en permettant de quantifier (selon les critères définis) la qualité de différents scénarios (qui se traduisent par différents jeux de données alimentant les modèles). Les critères optimisés servent alors de guide pour affecter des valeurs optimales aux différentes variables du modèle. Ceci sous-entend une prise de décision centralisée pour toutes les variables du modèle. En d'autres termes, malgré la présence de plusieurs acteurs, les solutions proposées seront celles réalisant un meilleur compromis à un niveau global, sans que chaque acteur ne soit libre d'optimiser lui-même sa propre décision.

Les cas de distribution mutualisée se prêtent parfaitement à ce type d'approche. Dans le cas contraire, les modèles peuvent servir à un acteur industriel unique, qui cherchera à optimiser son propre réseau, ou aux collectivités, dans l'hypothèse que les simplifications induites par la modélisation sont acceptables. Intégrer réellement dans les modèles les jeux d'acteurs, impliquerait de se tourner vers d'autres outils, tels que ceux de la théorie des jeux.

Mais l'utilisation de tels outils combinés aux modèles de recherche opérationnelle classiques dans un cadre aussi complexe que la logistique urbaine reste encore hors de portée.

5.5. *Généricité des outils*

Par nature, les modèles de recherche opérationnelle traduisent très précisément un problème formulé lui-même très précisément (voir Figure 3) - même si cette formulation très précise peut être ou ne pas être une représentation très précise de la réalité. Modifier la formulation du problème nécessite une adaptation, non nécessairement triviale, du modèle, voire des méthodes de résolution. Pourtant dans un contexte pratique, chaque industriel, chaque ville est un cas particulier. Il est donc très délicat de concilier précision dans la modélisation (verticalité) et adaptabilité à un éventail large de situations (horizontalité).

6. Conclusion

Nous avons, dans cet article, traité une thématique d'actualité, la logistique urbaine, et essayé de montrer comment les techniques issues de la recherche opérationnelle pouvaient utilement être associées aux méthodologies utilisées classiquement en sciences économiques ou sciences de gestion.

La logistique urbaine vise à définir de nouveaux schémas logistiques, respectueux de l'environnement, dédiés à la ville. Nous avons dans un premier temps rappelé les enjeux et intérêts de la logistique urbaine. Pour expliquer quels types de réponse pouvaient apporter la recherche opérationnelle, nous avons commencé par introduire deux modèles classiques, utilisés pour la conception de réseaux logistiques ; puis, nous avons détaillé comment les spécificités de la logistique urbaines pouvaient amener à reconsidérer ces modèles, et comment la littérature avait commencé à s'y intéresser. Nous avons enfin discuté d'éléments importants à bien comprendre lorsque l'on souhaite utiliser ces outils :

- la nécessaire interaction avec d'autres communautés scientifiques et l'expertise terrains pour la formulation du problème,
- le besoin d'une implication forte de partenaires pour la collecte des données,
- l'existence de certaines limites à accepter (données considérées en moyenne, difficulté de tenir compte des jeux d'acteurs...),
- la difficulté en l'état des connaissances de disposer d'outils « sur étagère ».

Ainsi, nous sommes convaincus que la recherche opérationnelle peut être d'un intérêt majeur pour aider à la planification stratégique en logistique urbaine ; et que la réussite d'un projet s'appuyant sur la recherche opérationnelle exige non seulement l'expertise technique, mais aussi une bonne prise de conscience de la part des partenaires et des acteurs en attente d'une solution (ou, tout au moins, d'éléments les aidant à la prise de décision) des points exprimés ci-dessus.

7. Bibliographie

Absi N., Boudouin D., Feillet D., Garaix T., Guyon O., (2010), "Un outil d'aide à la décision pour la localisation de plateformes logistiques pour le transport de marchandises en ville", rapport technique EMSE CMP-SFL 2010/6, Ecole des Mines de Saint-Etienne.

- Bektas T., Laporte G., (2011), "The pollution-routing problem", *Transportation Research Part B: Methodological*, 45(8), pp. 1232-1250.
- Boudouin D. (2006), "Guide méthodologique : Les espaces logistiques urbains", La Documentation Française.
- Browne M., Sweet M., Woodburn A., Allen J., (2005), "Urban freight consolidation centres final report", technical report, University of Westminster for the Department for Transport.
- Crainic T.G., (2008), "City logistics", Technical Report CIRRELT-2008-25, CIRRELT.
- Crainic T.-C., Ricciardi N., Storchi G., (2009), Models for evaluating and planning city logistics systems., technical report CIRRELT-2009-11, CIRRELT.
- Dablanc L., (2007), "Goods transport in large european cities: Difficult to organize, difficult to modernize", *Transportation Research*, 41:280--285.
- Delaître L., Molet H., Breuil D., (2007), "Vers une démarche globale d'optimisation de la logistique urbaine : fondements et position, *Française de Gestion Industrielle*", 26(3):63--82.
- Dufour J.-G., Patier D., Routhier J.-L., (2002), "Du transport de marchandises en ville à la logistique urbaine", rapport technique 59, Centre de Prospective et de Veille Scientifique, Direction de la Recherche et des Affaires Scientifiques et Techniques.
- Ehrgott M., (2000), "Multicriteria optimization", *Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems*, Springer-Verlag.
- Farahania R. Z., Miandoabchib E., Szetoc W.Y., Rashidid H., (2013), "A Review of Urban Transportation Network Design Problems", *European Journal of Operational Research*, Volume 229, Issue 2, September, pp. 281–302.
- Gérardin Conseil, (2007), "Bilan critique des projets d'expérimentations en matière de distribution urbaine de marchandises initiés par les collectivités territoriales dans les agglomérations urbaines françaises", rapport technique 02MT75, Direction de la Recherche et des Affaires Scientifiques et Techniques du Ministère de l'Équipement, des Transports et du Logement.
- Geroliminis N., Daganzo C.F., (2005), "A review of green logistics schemes used in cities around the World", technical report UCB-ITS-VWP-2005-5, UC Berkeley Center for Future Urban Transport.
- Gianessi P., Alfandari L., Létocart L., Wolfler Calvo. R., (2013), "The Multicommodity-Ring Location Routing Problem". Submitted to *Transportation Science* - 2nd revision.
- González-Feliu J., (2008), "Models and methods for the City Logistic. The Two-Echelon Capacitated Vehicle Routing Problem", PhD thesis, Politecnico di Torino.
- González-Feliu J., Morana J., (2010), "Are City Logistics Solutions Sustainable? The Cityporto case", *Trimestrale del Laboratorio Territorio Mobilità e Ambiente - TeMALab*, 3(2):55--64.
- Henriot F., Patier D., Bossin P., Gérardin B. (2008), "Méthodologie d'évaluation des innovations en matière de logistique urbaine", rapport final PREDIT GO 5 - Axe 3 : Logistique urbaine.
- Interface Transport, Gérardin Conseil, Laboratoire d'Economie des Transports, (2009), "Logistique et distribution urbaine", rapport technique, PIPAME.
- Jacobsen, S. K., Madsen, O. B. G. (1980), "A comparative study of heuristics for a two-level routing-location problem", *European Journal of Operational Research*, 5(6), 378-387.

- Kariv O., Hakimi S.L., (1979), "An algorithmic approach to network location problems. Part ii: The p-median", *SIAM Journal of Applied Mathematics*, 37(3):539--560.
- Klose A., Drexl A., (2005), "Facility location models for distribution system design", *European Journal of Operational Research*, 162(1):4--29.
- Maibach M., Schreyer C., Sutter D., Van Essen H.P., Boon B.H., Smokers R., Schroten A., Doll C., Pawlowska B., Bak M., (2008), "Handbook on estimation of external costs in the transport sector", technical report, Delft: CE Delft.
- Minoux M., (1989), "Network synthesis and optimum network design problems: models, solution methods and applications", *Networks*, 19(3):313--360.
- Munuzuri J., Cortès P., Grosso R., Guadix J., (2011), "Selecting the location of minihubs for freight delivery in congested downtown areas", *Journal of Computational Science*.
- Nagy G., Salhi S., (2009), "Location-routing: Issues, models and methods", *Journal of Operational Research*, 177(2):649--672.
- Organisation for Economic Co-operation and Development, (2003), "Delivering the Goods: 21st Century Challenges to Urban Goods Transport", OECD.
- Paché G., (2010), "Logistique urbaine mutualisée : quelle stratégie de différenciation pour le commerce alimentaire en ligne ?" *Revue Française de Gestion Industrielle*, 29(2):27--48.
- Papaux Y., (2006), "La logistique urbaine: Enjeux et étude du cas de Lausanne", Master's thesis, Université de Lausanne.
- Patier D., Routhier J.-L., (2009), "Une méthode d'enquête du transport de marchandises en ville pour un diagnostic en politiques urbaines", *Les Cahiers Scientifiques du Transport*, 55:11--38.
- Quariguasi Frota Neto J., Bloemhof-Ruwaard J.M., van Nunen J.A.E.E., van Heck E., (2008), "Designing and evaluating sustainable logistics networks", *International Journal of Production Economics*, Volume 111, Issue 2, February, pp. 195--208.
- Revelle C.S., Eiselt H.A., Daskin M.S., (2008), "A bibliography for some fundamental problem categories in discrete location science", *European Journal of Operational Research*, 184(3):817--848.
- Routhier J.-L., (2002), "Du transport de marchandises en ville à la logistique urbaine", Coll. 2001 plus, Série Synthèses et Recherches, n° 59, Centre de Prospective et de veille scientifique, DRAST.
- Srivastava S.K., (2007), "Green supply-chain management: A state-of-the-art literature review", *International Journal of Management Reviews*, 9(1):53--80.
- Taniguchi E., Kakimoto Y., (2003), "Effects of e-commerce on urban distribution and the environment", *Journal of Eastern Asia Society for Transportation Studies*, 5:2355--2366.
- Taniguchi E., Thompson R.G., (2002), "Modeling city logistics", *Transportation Research record*, 1790:45--51.
- Zanni A.M., Bristow A.L., (2010), "Emissions of CO₂ from road freight transport in London: Trends and policies for long run reductions", *Energy Policy*, 38(4):1774--1786.