

CIGI 2011

La mixité voyageurs/fret comme facteur de performance pour la mobilité urbaine

ANNA TRENTINI^{1,2}, NICOLAS MALHENE¹, HUGUES MOLET²,

¹ EIGSI, Ecole d'Ingénieurs en Génie des Systèmes Industriels
26, rue des Vaux de Foletier, 17041, La Rochelle, France
nicolas.malhene@eigsi.fr, anna.trentini@eigsi.fr,

² ENSMP, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris
60, bd Saint Michel, 75006 Paris, France
molet@ensmp.fr, anna.trentini@ensmp.fr

Résumé - Cette étude, conduite dans le cadre du projet de recherche national ANR CGOODS qui réunit plusieurs partenaires académiques et institutionnels, se propose d'évaluer l'intérêt de la mise en œuvre d'un système de transport urbain mixte au profit de voyageurs et du fret. Le système de transport proposé assure la distribution de marchandises à partir d'un centre de distribution urbaine, en s'appuyant sur une ligne de transport en commun. Les véhicules circulant sur la ligne utilisent leur capacité résiduelle pour transporter les marchandises. La marchandise est déchargée aux arrêts de la ligne. Un système de distribution capillaire associé à chaque arrêt assure la livraison de la marchandise aux destinataires finaux par des tournées. Nous visons à définir d'un point de vue organisationnel et fonctionnel les atouts économiques, environnementaux et sociétaux de ce système; le but étant de fournir un cadre méthodologique pour guider sa mise en place.

Abstract - This study, driving under the national research project ANR CGOODS, that combines several academic and institutional partners, aims to assess the interest of implementing an shared urban transport system for the benefit of passengers and goods. The proposed transport system ensures the supply of goods in a medium-sized town, from an urban distribution center, based on a transit line that carries passengers. Vehicles running on the line use their residual capacity to transport goods. The goods are unloaded by the stops of the line. An capillary distribution system associated with each stop ensures goods deliveries to final destinations. We aim to define the economic, environmental and societal impacts of this system, the purpose being to provide a methodological framework to guide its implementation.

Mots clés - transport urbain mixité voyageurs/fret, conception de modèles, support à la décision

Keywords - shared urban transport, passengers and freight, models design, decision support tools

1 INTRODUCTION

Dans une ville, personnes et marchandises recherchent des solutions de déplacement efficaces. Les unes nécessitent d'arriver à destination à l'heure, en fonction de rythmes cadencés sur des programmes précis. Les autres répondent à des critères de livraison bien précis comme les délais et doivent être déplacées rapidement pour ne pas créer d'immobilisations excessives de stocks et donc minimiser les dimensions des entrepôts et des coûts de gestion correspondants.

La mobilité urbaine a la finalité d'assurer l'ensemble des déplacements nécessaires à (Fusco, 2003):

- répondre à la «demande de la ville» exprimée par les personnes, à travers la nécessité de participer aux activités sociales et économiques de la ville, de développer les activités quotidiennes (travail, école, achats, visites et loisirs de proximité) et tous les aspects qui caractérisent la qualité de vie des habitants.
- approvisionner le système productif et commercial localisé dans les villes et distribuer à l'extérieur les

marchandises originaires des établissements économiques urbains.

Cependant les dynamiques des déplacements urbains de personnes et marchandises ont un poids considérable sur la détérioration de conditions environnementales de la ville - congestion de la voirie, nuisance sonore, accroissement des gaz à effet de serre, émissions de polluants -.

Ainsi les villes cherchent à mettre en place des services de transport destinés aux passagers et marchandises capables de rationaliser ces flux tout en assurant le développement des relations sociales et économiques et l'équilibre urbain. (Civitas, Bestufs II, UITP).

Hors trouver des leviers d'amélioration qui puissent agir autant sur les unes que sur les autres n'est pas facile, car les deux déplacements sont assurés par des logiques de transport très différentes (Ogden, 1992). Si les villes cherchent à réduire les impacts des déplacements des personnes en encourageant l'utilisation des services de transport en commun, elles doivent encore appréhender comment agir sur la distribution du fret, qui relève normalement du secteur privé et qui voit à l'origine de son transit des décisions industrielles.

Les tendances de ces dernières années montrent que, pour aller dans le sens d'une mobilité urbaine durable, il est de plus en

plus important de faire face aux problématiques liées au transport de personnes et de marchandises de façon intégrée et coordonnée. La Commission européenne a publié, le 25 septembre 2007, un Livre Vert intitulé « Vers une nouvelle culture de la mobilité urbaine ». Le document souligne l'importance de l'approche intégrée dans le développement d'une politique de mobilité urbaine. Dans le document, il est énoncé que: "La logistique du fret comporte une dimension urbaine. Du point de vue de parties prenantes, toute politique de la mobilité urbaine doit englober tant le transport des passagers que celui des marchandises" COM(2007).

Cependant la Commission Européenne n'a pas encore légiféré une politique orientée à l'adoption d'une approche intégrée de la mobilité urbaine (Trentini et Malhéné, 2010 a).

Selon les conclusions du projet européen MOTOS (2007), cette lacune est due au fait que le processus de développement des politiques publiques de gestion de la distribution urbaine est très lent, contrairement aux politiques de gestion des déplacements urbains des personnes.

Ainsi, un des plus grands défis qui se présente aux scientifiques, consiste à identifier des stratégies et des moyens de gestion intégrée du transport urbain de passagers et de marchandises.

Dans cet article:

- nous établissons des analogies entre les outils classiques de planification basés sur les logiques du Matériel Requirement Planning (MRP) et des outils d'aide à la décision pour planifier la distribution de marchandises.
- nous introduisons un système de transport urbain mixte au profit de voyageurs et du fret: cela signifie faire une utilisation conjointe de l'infrastructure et des moyens de transport urbain entre passagers et marchandises (Trentini et Malhéné, 2010b). Notre démarche s'appuie sur le postulat, défendu par d'autres spécialistes qu'il y a suffisamment de marge pour pouvoir intégrer les flux de voyageurs et de fret dans les ressources de transport existantes (Frost, 2008, Chiron-Augereau, 2009, Zuccotti et Konstaninopoulou, 2010, Levifre, 2011).
- nous proposons une méthodologie d'évaluation des performances de ce nouveau système ;

2 DES OUTILS DE PLANIFICATION INDUSTRIELLE POUR LA GESTION DE LA DISTRIBUTION URBAINE

Cette section a pour objet d'établir des analogies entre les outils classiques de planification basés sur les logiques de MRP et des outils d'aide à la décision pour planifier la distribution urbaine de marchandises. Nous allons développer successivement les parties suivantes : les rappels de la logique de planification MRP, la logique de la planification de distribution qui caractérise un réseau de transport urbain mixte, les différentes analogies possibles.

2.1 Les rappels de la logique de planification MRP

Le MRP est une méthode de gestion et de planification de production en flux poussé, basé sur les nomenclatures de produits et les prévisions des ventes. Pour chaque produit fini, à partir du besoin brut, on obtient le besoin net (besoin brut - stock). Grâce à la nomenclature (de combien de composants X a-t-on besoin pour fabriquer le produit fini Y ?), on peut remonter au nombre de composants nécessaires pour répondre à la prévision des ventes des produits finis. La méthode MRP date des années 75 et a pour objectifs principaux:

- d'établir une planification des besoins: ordres de fabrication (quand et combien faut-il produire de composants) et ordres d'achat (quand et combien faut-il

acheter de matières premières) afin de respecter le programme prévisionnel de production (appelé Plan Directeur de Production)

- d'assurer une cohérence de cette planification des besoins. Autrement dit, ces ordres de fabrication et d'achat sont-ils cohérents avec les capacités des différentes entités du système : machines, ateliers, fournisseurs, ressources humaines et financières,...

Bien d'autres applications sont attendues d'un système MRP : évaluation de stocks, calcul des prix de revient,... mais nous nous limiterons dans notre propos aux seules analogies avec la planification des besoins.

Pour répondre à ces objectifs, plusieurs bases de données sont nécessaires :

- tout d'abord le Plan Directeur de Production (PDP) qui définit les besoins en produits finis (quand et combien de produits doivent être fabriqués dans une période donnée)
- la nomenclature produits qui définit les relations entre le produit fini et ses composants (fabriqués et achetés)
- les ressources de production qui permettent de transformer les composants en composés jusqu'à l'élaboration du produit fini
- les gammes de fabrication qui permettent de connaître pour chaque article dont le produit fini, les ressources de production qui devront être mobilisées pour le fabriquer
- les stocks à tous les niveaux qui permettent de passer des besoins calculés à partir du PDP aux besoins réels ou besoins nets (achat ou fabrication) en tenant compte des stocks déjà disponibles.

D'autres informations sont nécessaires, comme par exemple les tailles de lots de fabrication ou d'achat, mais nous n'en parlerons pas ici car elles ne seront pas utilisées dans l'analogie.

A partir de ces bases de données, il est nécessaire de définir un algorithme de calcul des besoins : on utilise une planification au plus tard en partant du besoin final et en remontant étape par étape (les niveaux de la nomenclature) pour établir les besoins pour chacun des composants.

2.2 La logique de la planification de distribution urbaine

Imaginons une distribution de marchandises au départ d'un centre de distribution urbaine (CDU). A partir du CDU les marchandises sont chargées sur les moyens de transport en commun et dispatchées dans les différents arrêts, aux différents commerces.

Le centre de distribution urbain est une entité composée de stocks de différents produits (provenant de distributeurs variés). Le réseau irrigué par le CDU est composé de points de demande clients géographiquement dispersés : une demande se caractérise par une date demandée et une quantité à distribuer.

En toute rigueur, le délai de distribution n'est pas une donnée exogène au système; en effet, il dépend directement de la tournée, c'est-à-dire de la gamme de distribution (ordre par lequel les produits prélevés seront distribués aux points de demande), mais il dépend également des ressources du système, par exemple de la taille des moyens de transport.

La logique de distribution peut être assimilée à une planification au plus tard, cela permet, tout au long de la chaîne logistique, de limiter les stocks.

On trouve également une problématique de charges/capacités qui peut se traduire, comme dans la planification industrielle, par un besoin de ressources supplémentaires ou par une dégradation du service en termes de retard.

On dispose également au niveau du CDU d'un PDD (Plan Directeur de Distribution) composé de la demande, produit par

produit et période par période, des différents besoins du réseau. On voit bien à travers ces deux descriptions que de nombreuses analogies sont possibles entre le MRP et ce que l'on pourrait appeler un Management des Ressources de Distribution (MRD).

2.3 Des analogies possibles entre MRP et MRD

2.3.1 Le PDP devient le Plan Directeur de Distribution (PDD)

Le choix de l'horizon de planification et de la taille de la période du PDD dépend évidemment du système envisagé. Dans le cas de la distribution urbaine, il est raisonnable de définir une période journalière, voire une tranche horaire. Sur un horizon défini, par exemple la semaine, on va remonter période par période les besoins de chaque point du réseau à distribuer.

2.3.2 Les gammes de distribution

Chacun des articles devra être disponible dans le CDU à la date j – durée de distribution. Cette durée dépend de l'algorithme de la tournée ; aussi contrairement au MRP, les gammes de distribution ne sont pas fixées mais calculées pour chaque période en fonction de la tournée retenue. De nombreux algorithmes sont disponibles pour définir ces tournées (on peut utiliser par exemple celui de Clarks et Wright).

On obtient ainsi le besoin brut pour chaque article. Le niveau des stocks de chaque article dans le CDU donne le calcul des besoins nets.

On s'arrête ici au niveau du CDU, mais on pourrait bien évidemment faire remonter les calculs aux niveaux supérieurs et ainsi déterminer les besoins nets à tous les niveaux des fournisseurs (on se retrouverait dans une logique proche du DRP (Distribution Ressources Planning)).

2.3.3 Simulations charges/capacités

Dans le cas qui nous intéresse ici, ces simulations (comme dans le cas du MRP) peuvent intervenir à deux niveaux :

Une macro simulation au niveau du PDD : globalement, il s'agit d'évaluer la flotte de ressources sur l'horizon de planification. On ne peut raisonner que sur des grandeurs macro. Une façon de faire est la suivante :

- on définit une notion de charges moyennes par tournée, c'est-à-dire le nombre de colis transportés dans chaque tournée. Il va de soi que ceci n'a de sens que si les colis sont suffisamment homogènes. Sinon, soit on raisonne en containers ou contenant standard, soit on passe par une correspondance entre un colis donné et un équivalent-colis. Simplifions en supposant que les colis sont suffisamment homogènes pour être « additifs »
- sur l'horizon donné, on calcule :

$$\sum_{\text{de } 1 \text{ à } n \text{ périodes}} \sum_{\text{de } 1 \text{ à } m \text{ clients}} \text{colis sur l'horizon } \Delta$$

N est la charge totale à transporter sur l'horizon Δ par exemple la semaine.

$N/\text{charges en colis par tournée} = \text{Nombre de tournées sur l'horizon}$

$\tilde{N} = \text{Nombre de tournées sur horizon}/\text{nombre de périodes}/\text{nombre de tournées par ressource et par période}$

\tilde{N} est une estimation de la flotte nécessaire en moyenne par période.

2.3.4 Une simulation sur chaque période

Le calcul précédent est un calcul en moyenne qui est pleinement justifié s'il n'y a pas trop de disparité de charge de

transport d'une période à l'autre.

Le calcul des ressources nécessaires période par période est évidemment : besoins en colis sur 1 période/charges moyenne en colis par tournée/nombre de tournées par ressource et par période. On arrondit à l'entier supérieur. Ce calcul donne période par période, le calcul des besoins en ressources, ceci permet en prévisionnel de définir une politique d'utilisation des ressources et de la sous-traitance nécessaire éventuelle.

D'autres analogies seraient possibles comme par exemple, la connaissance en temps réel des stocks prévisionnels, en cours ou livrés chez le client. De même, l'algorithme de tournées joue le même rôle que l'algorithme d'ordonnancement dans le MRP puisque dans les deux cas, on suppose que, sur une période donnée, toutes les tournées (toutes les opérations des gammes prévues) seront réalisées.

Nous allons maintenant utiliser une grande partie de ces analogies pour les appliquer au méta - modèle dans lequel les marchandises partant d'un CDU vont être transportées par des transports en commun mixtes, c'est-à-dire transportant des passagers et des marchandises.

Si les logiques du modèle MRD demeurent, elles doivent toutefois être adaptées: en effet, les horaires des ressources de distribution CDU – arrêts du transport public sont définis, mais l'on retrouve une notion de tournées entre un arrêt défini et les besoins de la zone qui est affectée à cet arrêt.

3 LE SYSTEME DE TRANSPORT URBAIN MIXTE

Traditionnellement, les marchandises sont transitées en zone urbaine par plusieurs réseaux de transport, disposant chacun de son implantation en zone urbaine qui élance chaque jour des dizaines de véhicules de livraison qui se mêlent et se croisent accentuant les nuisances (Figure 1).

En parallèle, les personnes peuvent se déplacer en transport en commun, ou transport collectif, qui consiste à transporter plusieurs personnes ensemble sur un même trajet, généralement accessible en contrepartie d'un titre de transport (billet, ticket, carte).

L'un des principes de base des transports en commun est celui de rassembler des voyageurs dans un même véhicule pour réaliser des « économies d'échelle ».

Des études montrent que les transports en commun se révèlent viables lorsque la fréquence et le taux moyen d'occupation sont élevés, ce qui n'est généralement possible que dans des grandes villes denses (WBCSD, 2004).



Figure 1 : implantations en zone urbaine

Notre étude propose une nouvelle organisation du transport urbain qui agit sur trois paramètres majeurs de la circulation de passagers et marchandises (fig. 2):

- Le taux d'occupation des transports en commun;
- L'organisation macroscopique de la distribution des marchandises (et des enlèvements);
- La flotte (volume et énergie) et le type des véhicules mis en service pour la livraison.

Le nouveau schéma logistique prévoit:

- un centre de distribution urbaine plurimodal destiné à recevoir et consolider les flux de palettes, colis et plis de différents réseaux.
- A partir de là, les marchandises seraient chargées sur des moyens de transport public, tels que des bus, de trams ou des wagons du métro, qui effectueraient un service de transport urbain mixte au profit de voyageurs et du fret, exploitant la capacité résiduelle de leurs lignes. La marchandise serait ensuite déchargée aux arrêts de la ligne.

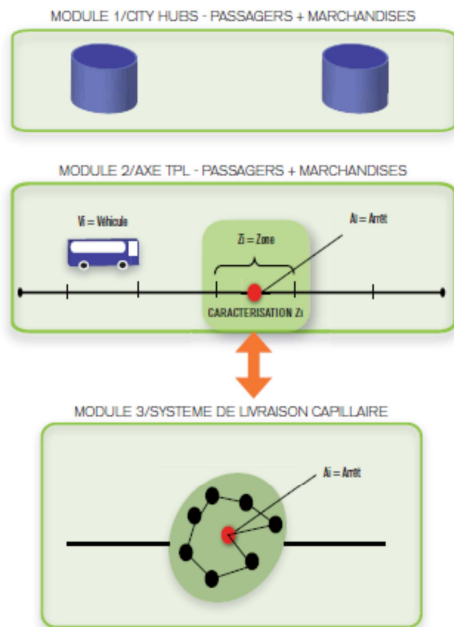


Figure 2 : schéma du modèle mixte

En correspondance des arrêts, des bases logistiques seraient implantées couvrant un périmètre de distribution proche et limité. Un système de distribution capillaire associé aux bases logistiques assurerait la livraison de la marchandise aux destinataires finaux par des tournées avec des véhicules de livraison à impact environnemental faible ou absent (fig. 3) avec des déplacements optimisés et des kilomètres parcourus moindres.



Figure 3 : exemple de véhicule pour les livraisons

3.1 Illustration du système logistique proposé

La nouvelle organisation du transport urbain que nous proposons se révèle novatrice surtout pour l'introduction de la mixité au profit des voyageurs et du fret dans le transport urbain. Nous pouvons rappeler des expériences de transport de

marchandises mises en place à travers l'utilisation du réseau de transport en commun, comme le métro ou le tramway.

On découvre en autres :

- trois expériences internationales utilisant le métro : celui de Chicago, celui de Londres et le projet de métro de Tokyo.
- l'expérience pilote d'Amsterdam, qui a été tentée afin de desservir le centre-ville par le tramway à partir de points de stockage situés en périphérie.

Cependant ces exemples se caractérisent par leur singularité et l'inexistence de toute mixité: les quatre projets prévoient des réseaux exclusivement réservés au transport des marchandises et sans connexion avec les réseaux de voyageurs.

L'organisation d'un transport urbain mixte n'est donc pas adoptée, du moins en Europe. Nous avons repéré deux exemples que peuvent illustrer seulement partiellement le concept proposé :

- *Distripolis* à Paris, décrit bien le fonctionnement de la distribution capillaire à partir des bases logistiques localisées à l'intérieur de la ville.
- *Freight*Bus* à Londres, propose l'exploitation de la capacité résiduelle des bus pour le transport urbain de marchandises.

3.1.1 Distripolis à Paris

Opérateur global de la chaîne logistique et filiale à part entière du groupe SNCF, Geodis est un prestataire européen à vocation mondiale (4ème prestataire logistique en Europe).

Le 27 juin 2011, SNCF Geodis a lancé un nouveau projet Distripolis qui réorganise sa logistique « du dernier kilomètre ». Ce projet va démarrer d'abord à Paris et se mettre en place progressivement entre 2011 et 2015; Il vise à mutualiser les flux des différents réseaux de SNCF Geodis (Calberson, France Express et Ciblex) et à optimiser les parcours en évitant au maximum le transport à vide. Car actuellement, 25% des trajets de camion sont effectués à vide dans la capitale. En amont, les marchandises seront acheminées jusqu'à la plateforme multimodale de Bercy, puis elles seront réparties sur huit bases logistiques, baptisées les bases Blue, situées notamment aux gares de Montparnasse, du Nord, de Saint – Lazare, et aux Halles (Figure 3).

A partir de là, les petits colis et palettes jusqu'à 200 kg seront acheminés vers leurs destinations finales par :

- des véhicules électriques légers de type « Electron » d'une capacité de 20 m³, loués à la société Fraikin (20 véhicules en 2011, 75 en 2015),
- des tricycles à assistance électrique (8 véhicules en 2011, 56 en 2015),
- des transpalettes électriques au fonctionnement silencieux même dans le franchissement des trottoirs.



Figure 3 : distribution depuis les bases logistiques

Les livraisons de plus de 200 kg seront assurées par des camions aux normes Euro 5 et à terme, par des camions Euro 6 ou hybrides, qui partiront de Bercy.

Le recours à ces véhicules « propres » génère un surcoût d'exploitation de 20 à 25%. Mais Guillaume Pepy, le président de la SNCF, explique qu'au final, la facture adressée au client sera la même que dans le cadre d'un transport classique grâce aux économies générées par la meilleure efficacité de la distribution. C'est un projet pionnier et sans équivalent: c'est un nouveau produit de logistique urbaine », assure Guillaume Pepy, « Un nouveau système informatique optimise les tournées au milieu urbain et enregistre, d'ores et déjà, une réduction de 5% de la distance parcourue par les véhicules de livraison », précise aussi SNCF Geodis dans un communiqué.

Selon l'un de ses responsables, Geodis effectue 5500 livraisons par jour à Paris. Une vingtaine de pourcent devraient utiliser ce nouveau service. Ses promoteurs estiment que « Stripolis va se traduire dès cette année par une diminution de 365 tonnes équivalent CO₂ de gaz à effet de serre (- 18% des émissions actuelles de Geodis à Paris). En 2015, la réduction devrait atteindre 1747 tonnes (- 85%). »

A terme, SNCF Geodis souhaite proposer ce dispositif à une trentaine de villes en France, en commençant par Lille, Bordeaux et Strasbourg, ainsi qu'à de grandes villes européennes, surtout en Allemagne, précise Pierre Blayau, le directeur général de SNCF Geodis.

3.1.2 Freight*Bus à Londres

La municipalité de Londres dans le 2008 a organisé un concours intitulé "Un nouveau bus pour Londres". Le but était d'imaginer le bus du futur pour la capitale britannique, propre et pratique. Hugh Frost, un designer industriel anglais, s'est attaqué à ce challenge et a proposé le Freight*Bus. De l'actuel bus londonien, il reprend l'idée d'un bus à deux ponts et la couleur. Le Freight*Bus peut, outre des usagers, convoier des cartons, des marchandises... afin de limiter les déplacements des camionnettes de livraison dans Londres. Le Freight*Bus a été prévu pour cela dans sa conception en amont (des rangées de sièges "descendent" du plafond en cas de forte influence). Concernant le caractère écologique de l'engin, son concepteur propose un système hybride GPL/électrique., L'idée du Freight*Bus est séduisante. En effet, ce véhicule peut accueillir 130 passagers, et grâce à ses sièges pliants, il devient un porte-marchandises capable de transporter jusqu'à 35 palettes. Equipées d'une motorisation hydrogène ou électrique, ses roues sont capables de passer en mode « crabe » pour le ranger facilement le long des arrêts de bus.

3.2 Esquisse d'un modèle de base

En s'appuyant sur les exemples précédents, nous avons cherché à développer un modèle adapté à une ville moyenne française : La Rochelle. Ce modèle cherche à utiliser un transport mixte marchandises/passagers à partir du réseau actuel de transports en commun. Nous allons présenter succinctement ce modèle.

Les principales données du modèle :

- Un CDU à capacité infinie et doté de toutes les marchandises à distribuer
- Les clients :
 - o Positionnés géographiquement $C_i = (x_i, y_i)$ afin de connaître l'arrêt dépôt de rattachement ;
 - o Demandes connues par tranche horaire j pour le client $C_i = D_{i,j}$
- les zones de distribution : pour chaque client C_i , ses coordonnées permettent de l'affecter à un arrêt – dépôt k . Un arrêt – dépôt regroupe ainsi tous les clients qui lui ont été affectés. Pour simplifier on appellera C_{ik} le client i affecté à la zone k , c'est à dire lié à l'arrêt dépôt k . La

tournée capillaire organisée à partir du dépôt k lui assurera sa demande.

3.2.1 Première partie du modèle : du CDU aux arrêts

Première étape : rattachement clients – zone : on regroupe tous les clients affectés à la zone k et servis par le dépôt arrêt k .

Deuxième étape : pour un client $C_{i,k}$, on connaît sa demande par tranche horaire.

Pour $C_{i,k} \Rightarrow D_{i,j,k}$ avec i client, k zone, j tranche horaire

J varie de l'heure de départ du premier transport en commun mixte à la dernière heure de départ de la journée.

On pourrait avancer toutes les demandes d'une tranche horaire (sauf la première) pour tenir compte du délai de distribution capillaire.

Pour une zone k , on a ainsi par addition les demandes, tranche horaire par tranche horaire.

Troisième étape : on établit alors le Plan Directeur de Distribution (PDD) : demande horaire par arrêt/zone.

Quatrième étape : pour une tranche horaire on connaît les horaires de départ des moyens de transport et le nombre de passagers maximum. Pour chaque moyen de transport, il va donc y avoir une capacité résiduelle de :

- 0 si le moyen de transport est complet sur l'un des tronçons (tronçon entre deux arrêts - dépôts)
- V_r = capacité résiduelle maximale (volume disponible du transport public – l'occupation max sur un tronçon).

On peut à ce niveau établir un volume maximum réservé aux marchandises même si la capacité résiduelle est plus élevée que ce volume réservé.

On calcule sur une tranche horaire $C_j = \sum \text{capacité résiduelle}$ sur cette tranche j pour tous les trams partant dans cette tranche j .

Si C_j est suffisant pour transporter D_j alors le transport mixte est possible et sans retard. Sinon, on calcule $D_j - C_j$ et on essaie d'assurer ce transport en $j - 1$ en priorité (tranche horaire précédente). On remonte ainsi le calcul de la dernière tranche horaire à la première. S'il se trouve que l'on a encore une charge résiduelle à transporter en première tranche horaire, on fera partir un ou plusieurs moyens de transport supplémentaires pour assurer la totalité des livraisons restantes.

3.2.2 Deuxième partie du modèle : distribution capillaire

Jusqu'à présent, on a déconnecté les deux modèles ; autrement dit, la première partie permettait d'acheminer en temps requis les marchandises dans les arrêts dépôts. Implicitement, on a considéré que la seconde phase de distribution capillaire était déconnectée de la première grâce à la présence de stockage de marchandises à chaque arrêt – dépôt.

Des lors, on se retrouve avec une seconde phase consistant à assurer les tournées par tranches horaires des marchandises dans la zone associée en fonction des besoins que l'on connaît (ceux qui ont servi à établir le PDD).

On utilise un simple algorithme de tournées sur les N points de la zone affectés à chaque arrêt. Cela suppose un stockage illimité aux arrêts – dépôts, ainsi que ses ressources de distributions sans contraintes.

3.2.3 Troisième partie : complexification du modèle

Nous allons maintenant introduire quelques contraintes nouvelles :

a. Au niveau des arrêts dépôts

On peut, en maintenant la possibilité de stockage en arrêt – dépôt, définir un volume maximal par arrêt de marchandises à décharger. On doit alors vérifier au préalable que :

Par tranche horaire $\sum D_{ik}$ pour la tranche j

$$\sum D_{ik} \geq$$

Capacité de l'arrêt – depot k, i varie de 1 à l'ensemble des clients de la zone k.

Sinon il faut reporter le volume demandé dans la tranche horaire suivante en s'assurant au préalable que :

La demande totale de la journée \leq Capacité de chaque dépôt x (n) tranches horaires.

On pourrait raisonner plus finement non plus par tranche horaire, mais par arrivée de moyens de transport.

Si l'on suppose qu'il n'y a pas de stockage en arrêt – dépôt, il faut que les ressources de distribution soient disponibles à l'arrivée de chaque moyen de transport public. Cela suppose d'asservir les arrivées de ressources destinées au transport capillaire aux horaires et à la charge de marchandises transportées par chaque moyen de transport public. Ce modèle devient trop complexe dans un premier temps car il doit fonctionner en temps réel et supposer des aménagements de stockage pour les ressources de distribution.

b. Les emballages des marchandises :

On peut prévoir des emballages pour le transport depuis le CDU jusqu'à les dépôts – arrêts (un emballage est affecté à une zone depuis le CDU).

Dans ce cas, il faut gérer le retour des emballages. Cela complexifie le problème puisque le volume des emballages vides se rajoute à celui des emballages à transporter ; ceci doit être pris en compte dans le calcul des charges à transporter. Il faudra également faire l'hypothèse que systématiquement les emballages vides sont disponibles dans la tranche horaire immédiatement supérieure à celle de leur distribution. Cela suppose que le transport capillaire est systématiquement assuré pour que les emballages soient disponibles.

Cette complexification pourrait intervenir ultérieurement.

c. Limite de capacité au CDU

Cette nouvelle contrainte nécessiterait de définir cette fois le modèle d'approvisionnement du CDU à partir de la demande des clients sur le moyen et long terme.

En fait, le PDD précédemment utilisé devrait générer au niveau supérieur, un besoin par période à remonter aux fournisseurs du CDU.

On serait amené également à introduire une condition charge / capacité au niveau des fournisseurs et des ressources de transport fournisseurs – CDU. Cette complexification amènerait à faire de nombreuses autres hypothèses sur les disponibilités au niveau des fournisseurs. Elle ne semble pas utile dans un premier temps.

4 METHODOLOGIE DE COMPARAISON

L'objectif de notre recherche est d'évaluer les performances d'un système de transport urbain mixte comparé à un système de référence caractérisé par: un CDU à partir duquel les tournées sont effectuées par des véhicules de tonnage non supérieur à 3,5 t, à alimentation électrique, thermique ou hybride, selon les restrictions en vigueur.

Pour ce faire, nous avons recours aux concepts et techniques de la recherche opérationnelle. Le problème de conception du réseau semble correspondre à notre cas de figure (Network Design Problem). Nous définissons ici la version basique de ce problème classique en faisant recours aux travaux de (Guyon et alii, 2010).

4.1 Le problème de conception du réseau classique

Le network design problem vise à concevoir un réseau optimal sur lequel des entités seront transportées entre différents points.

Dans le modèle générique: le fixed cost network design problem, (Magnanti et Wong, 1984; Minoux, 1989; Crainic, 2000), 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 d'entités $e \in E$ à transporter sur le réseau ; une quantité q_e de chaque produit transitant depuis un nœud origine $o_e \in N$ vers un nœud destination de $\in N$. 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 sélection) et des coûts de transport, dits variables (chaque arc de A a un coût de transport selon l'entité $e \in E$ en transit).

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 (non linéaire...). Nous renvoyons le lecteur à (Magnanti et Wong, 1984; Minoux, 1989; Balakrishnan et alii, 1997; Thomadsen et Stidsen, 2007) pour un état de l'art complet et les principales références à ces variantes.

D'un point de vue théorique, beaucoup de network design problems sont NP-difficiles (Crainic, 2000). Un grand nombre de problématiques classiques de la recherche opérationnelle peuvent être formalisées sous la forme d'un network design problem (Wong, 1978; Magnanti et Wong, 1984). Parmi eux figurent par exemple le problème du plus court chemin, le problème de l'arbre de Steiner, le problème du voyageur de commerce.

4.2 Critères d'évaluation

L'objectif de notre étude est de quantifier la valeur de la solution proposée sur les trois aspects du développement durable que sont l'économie, l'environnement et la société.

les principaux éléments qui serviront à mesurer la valeur de toute solution de notre modèle, sous chacun de ces trois aspects :

- Economie
 - coût d'achat des véhicules
 - coût de fonctionnement des véhicules
- Environnement
 - Émission de gaz polluants. Cette émission de gaz est dépendante de la taille estimée des tournées urbaines, mais aussi des distances parcourues entre la plate-forme et la première zone de demande servie et entre la dernière zone de demande servie et la plate-forme
 - Nuisance sonore. Cette nuisance est due aux bruits générés par les véhicules (en circulation et à l'arrêt) et par les plates-formes; la nuisance du bruit généré par les plates-formes logistiques étant fortement corrélée à leur taille et à leur localisation. Une plate-forme de taille moyenne en plein centre-ville généra par exemple davantage de riverains qu'une plate-forme plus imposante en lointaine périphérie.
 - Taux de congestion de la voirie. Ce taux s'exprime en fonction du nombre et du type de véhicules envoyés sur chaque zone de demande.
- Société
 - Qualité du service du transport public. Liée directement à la minimisation du temps d'attente des passagers aux stations, de la durée de correspondance et de la durée de

trajet des passagers dans les transports en commun (régularité).

Nous n'entendons pas agréger, dans une seule et même fonction-objectif, l'ensemble des éléments présents ci-dessus. Compte tenu de la disparité évidente de ces critères, une telle fonction n'aurait en effet que peu de sens. notre ambition est de pouvoir proposer au décideur, en sortie de notre modèle, des indicateurs significatifs lui permettant de juger efficacement, grâce à son expertise, la valeur de la solution proposée.

5 CONCLUSION

« Le rôle des pouvoirs publics en matière de transport urbain de passagers et marchandises est triple : ils doivent tout à la fois rendre accessibles de façon équitable les services publics pour les citoyens dont les horaires sont de plus en plus atypiques et irréguliers ; ils doivent assurer ou rendre possibles les services collectifs permettant aux activités économiques et aux individus de développer de nouveaux rythmes et horaires ; Enfin ils doivent coordonner voire réglementer les temporalités privées au nom de l'intérêt général, de la maximisation des économies externes et de la lutte contre les inégalités sociales. Ces interventions multiples nécessitent le recours à une batterie d'instruments diversifiés ». (Ascher, 1997).

Dans cet article nous avons décrit les éléments centraux d'un travail de recherche qui vise à construire un prototype d'outil d'aide à la décision permettant aux autorités organisatrices de transport urbain d'optimiser le partage de l'ensemble du système de transport entre voyageurs et marchandises.

Les outils d'aide à la décision dans ce domaine doivent être adaptés à la réalité du décideur, qui veut obtenir une estimation des conséquences de la mise en œuvre d'une combinaison d'actions simultanées.

Avec ces outils, le décideur pourra examiner les conséquences de ses décisions sur la répartition modale et les flux, sur l'environnement, sur l'économie et la performance globale du système de transport de marchandises en milieu urbain.

Des prototypes de plusieurs outils d'aide à la décision et des méthodologies seront développés et expérimentés au cours du projet. Nous avons proposé dans cet article un nouveau schéma logistique, plus respectueux de l'environnement, dédié à la ville et qui préfigure ce que pourront être les transports urbains de demain.

6 REFERENCES

Asher F. (1997), Du vivre en juste à temps au chrono-urbanisme, Les Annales de La Recherche Urbaine n° 77, 0180-930-XII-97/77/113/10 © MELT

Balakrishnan A., Magnanti T.L., Mirchandani P (1997) Annotated Bibliographies in Combinatorial Optimization : Network Design, pages 311 – 334. Wiley, New York.

Ballot E., Molet H. (2003) Contribution à l'évaluation du transport capillaire : définition d'unités d'œuvre cohérentes, Revue Française de Gestion Industrielle vol. 22, N°4, 2003

BESTUFS II, Best Practice Handbooks, http://www.bestufs.net/bestufs2_bp_handbook.html

Chiron-Augereau V. (2009), Du transport de marchandises en ville à la logistique urbaine, quels rôles pour un opérateur de transports publics urbains? L'exemple de la RATP, thèse de doctorat, Université Paris-Est

CIVITAS, <http://www.civitas-initiative.org>

COM (2007) 551 final, Livre Vert : Vers une nouvelle culture de la mobilité urbaine, Bruxelles, 25 .9. 2007

Crainic T.D. (2000) Service Network design in freight transportation. European Journal of Operational Research, 122 : 272 – 288

Frost H., (2008), Freight*Bus, The bus that Delivers!, available on www.onroutebus.co.uk

Fusco G. (2003), Un modele systemique d'indicateurs pour la durabilité de la mobilité urbaine : le cas de Nice et Genes dans une comparaison internationale. These de doctorat Université de Nice – Sophia Antipolis.

Guyon, O., Absi N., Boudouin D., Feillet D., (2010), Plates-formes en centre ville pour la Logistique Urbaine: etude sur la ville de Marseille, 2ème Journée de Recherche "Mobilité, Transport et Logistique" (MTL 2010), Lyon : France.

Levifre H., (2011), Le projet TramFret, Mise en place d'une expérimentation de transport de marchandises par le tramway, intervention table ronde du 1 Colloque annuel FRELON, Propos raisonnables sur la logistique urbaine, 22 mars 2011, Mines ParisTech,

Magnanti T.L., Wong R.T. (1984), Network design and transportation planning : Models and algorithms. Transportation Science, 18(1) :1 - 55

Malhéné N., Breuil D. (2010), Conceptualization of the evolution process of Urban Freight Transport, Proceedings of the 3rd International Conference on Information Systems, Logistics and Supply Chain Creating value through green supply chains ILS 2010 – Casablanca (Morocco), April 14-16

Minoux M (1989), Network synthesis and optimum network design problems : models methods and applications. Networks, 19(3) :313 - 360

MOTOS, (2007), Transport Modelling: Towards Operational Standards in Europe, www.transport-research.info

Ogden K.W. (1992), Urban Goods Movement. Ashgate. ISBN 1-85742-029-2.

Roque M., Delaître L., (2009), Vers une interopérabilité de la modélisation des flux de passagers et de Marchandises en milieu urbain, 8eme Congrès International de Génie Industriel, Bagnères de Bigorre, France, 10 -12 juin.

Thomadsen T., Stidsen T. (2007), The generalized fixed – charge network design problem, Computers & Operations Research, 34 :997 – 1007.

Touzi W., Alix T., Vallespir B. (2009), Etude le l'innovation et de la spatialisation des services en vue de leur caractérisation, 8eme Congrès International de Génie Industriel, Bagnères de Bigorre, France, 10 -12 juin.

Trentini A., Malhéné N., (2010a), Maitriser la coexistence des flux de passagers et de marchandises en milieu urbain, Revue Française de Gestion Industrielle, N. 2/2010 - Vol.29/Juin 2010.

Trentini A., Malhéné N., (2010b), Toward a shared urban transport system ensuring passengers & Goods Cohabitation, N. 2/2010, TeMA - Trimestrale del Laboratorio Territorio Mobilità Ambiente, www.tema.unina.it, On line ISSN: 1970 – 9870 Print ISSN: 1970 – 9889.

UITP (2006), Le rôle du transport public dans la réduction du changement climatique et l'amélioration de l'efficacité énergétique, www.uitp.com/eupolicy

Zuccotti S., Konstaninopoulou L., (2010), CityLog, verso nuove soluzioni per la distribuzione urbana delle merci, <http://www.tema.unina.it>, ISSN 1970-9870, Vol 3 - No 2 - giugno 2010 pagg. 29-36

WBCSD (2004), Mobility 2030: Meeting the Challenges to Sustainability, available on <http://www.wbcds.org>

