



WCTR

FRETURB : UN MODELE DE SIMULATION DES TRANSPORTS DE MARCHANDISES EN VILLE

PIERRE-LOUIS AUBERT

Laboratoire d'Economie des Transports (CNRS - ENTPE - Université Lyon2)
14 avenue Berthelot, 69365 LYON CEDEX 07, France

JEAN-LOUIS ROUTHIER

Laboratoire d'Economie des Transports (CNRS - ENTPE - Université Lyon2)
14 avenue Berthelot, 69365 LYON CEDEX 07, France

Résumé :

La prise de décision en matière d'approvisionnement ou de logistique urbaine relève de logiques éclatées entre la rationalité des firmes (chargeurs, opérateurs de transport) et celles des aménageurs et des collectivités locales. Nous présentons ici un modèle de simulation des effets de mesures prises à l'échelle d'une agglomération. Ces mesures concernent l'organisation logistique des entreprises, l'aménagement urbain (y compris la répartition des activités urbaines) et le cadre réglementaire du transport urbain de marchandises. Son originalité réside dans le fait qu'il s'appuie sur la notion de mouvement (opération de livraison ou d'enlèvement dans un établissement), sans passer par la contrainte de construction d'une matrice O/D de véhicules ou de marchandises qui, à notre avis et contrairement aux modèles de déplacements de personnes, manque d'opérationnalité en agglomération du fait de la spécificité de l'approvisionnement urbain en tournées complexes avec ruptures de charges sur les plates-formes.

PROBLEMATIQUE, CONTEXTE ET OBJECTIFS

L'organisation des transports de marchandises dans la ville (TMV) s'avère particulièrement complexe (Cf. OGDEN, 1992). En effet, il existe une multiplicité d'opérateurs du transport (entreprises en compte propre destinataires ou expéditeurs, entreprises de transport, et enfin les habitants eux-même), une profusion de conditionnements de la marchandise et de nombreux types de véhicules, plusieurs modes d'organisation (traces directes ou tournées de forme et de tailles diverses selon la marchandise transportée), de nombreuses réglementations, souvent contradictoires selon les communes qui composent les unités urbaines, une multiplicité d'acteurs économiques et institutionnels dont les intérêts sont parfois divergents.

De plus, la prise de décision en matière d'approvisionnement ou de logistique urbaine relève de logiques éclatées entre la rationalité des firmes (chargeurs, opérateurs de transport en constante mutation) et celles des aménageurs et des collectivités locales. Or, les instruments de modélisation susceptibles d'aider à une organisation cohérente de la logistique urbaine sont encore peu développés et encore moins utilisés par les décideurs.

C'est pourquoi, en France, comme dans d'autres pays, il n'est jusqu'à une période récente, pas apparu possible d'aborder la problématique des transports de marchandises dans la ville dans sa globalité. En France, pendant près de 20 ans, la recherche sur les marchandises en ville a été laissée pour compte au profit des déplacements de personnes. Depuis 1993, un programme national a été lancé. Il reflète une préoccupation au niveau de l'état qui est relayée de manière très variable selon les villes. Lorsque l'approvisionnement urbain est pris en compte, c'est en général pour tenter de répondre à des préoccupations très locales (conflits d'usage de la voirie en centre-ville, problèmes liés à la localisation des plates-formes logistiques ou des accès aux terminaux multimodaux). Cette préoccupation est stimulée par la prise en compte de l'approvisionnement urbain dans les « Plans de Déplacements Urbains » rendus obligatoires en France pour les agglomérations de plus de 100 000 habitants, dans le cadre de la récente loi sur l'air et la réduction des nuisances. L'article 28-1 des PDU énumère les orientations sur lesquelles portent les plans de déplacements urbains, et assurent la traduction concrète de l'objectif des plans défini dans l'article qui précède : « assurer un équilibre durable entre les besoins en matière de mobilité et de facilité d'accès, et la protection de l'environnement et de la santé, permettre un usage cordonné de la circulation et faire la promotion des véhicules propres et peu gourmands en énergie ».

LES MODELES DEVELOPPES DANS DIFFERENTS PAYS

Les premiers modèles de génération des flux de transport de marchandises à l'échelle urbaine datent de la fin des années 1970. Ceux-ci sont fondés sur la mesure des émissions et des réceptions de marchandises dans différentes zones, selon les types d'activité desservies ou de produits transportés. Les flux de véhicules sont déduits de manière normative des flux de marchandises transportées. Ces modèles utilisent des techniques de régression entre les trafics observés et certaines données socio-économiques.

Depuis quelques années, un certain nombre de modèles de TMV sont de nouveau développés dans plusieurs pays. Ceux-ci peuvent être classés en trois types :

- les modèles traditionnels à quatre étapes (génération, distribution, répartition modale, affectation), qui intègrent les flux de véhicules de marchandises comme un segment de demande particulier. Ils utilisent généralement un modèle gravitaire pour générer des flux de marchandises zone à zone et s'appuient sur des données de comptages pour le calage d'une matrice origine-destination (O/D) pour la phase de distribution du modèle. Ils permettent de simuler l'effet de nouvelles infrastructures de transport (plates-formes, réseaux) ainsi que des

effets de la réglementation. En revanche, ceux-ci sont, à notre sens, peu adaptés pour prendre en compte des modifications dans la gestion et l'organisation des chaînes logistiques.

- Des modèles qui utilisent des résultats d'enquêtes spécifiques qui permettent de connaître notamment la répartition des tournées selon le type de véhicule, les activités desservies et la taille de la tournée, afin de prendre en compte la spécificité de l'organisation des trajets de véhicules en tournées. La génération et l'attraction par zones est calculés par régression. Une matrice O/D de véhicules entre les différentes zones est calculée. Deux types de modèles sont utilisés pour y parvenir :
 - ◆ les modèles « stochastiques » utilisent des tables de fréquences qui permettent d'estimer, pour chaque tournée, les probabilités de localisation de son point de départ, son nombre d'arrêts et de la localisation (par zone) de chaque arrêt qui la composent. (VISSER, 1997). On peut ensuite déformer cette matrice en modifiant la génération ou les lois de distribution.
 - ◆ des modèles « d'entropie », qui s'appuient sur la minimisation d'une fonction d'entropie sur la distribution des trafics visant à estimer les véhicules.km, les tonnes.km et les flux de véhicules de divers types entre deux zones. Le calage de cette matrice est effectué selon des comptages. Cette approche permet d'identifier pour chaque tronçon entre deux zones, la contribution de chaque paire O/D. Une difficulté d'opérationnalité de ce calcul provient du fait qu'une paire O/D fait partie de différentes tournées et que l'algorithme fait l'ajustement sur une seule partie de la tournée, alors qu'il devrait avoir un impact sur l'ensemble de cette tournée (ERIKSSON *et al.*, 1997).
- Des modèles fondés sur la génération des flux, sans tenter de réaliser une matrice O/D de véhicules. Une bonne connaissance sur la génération des livraisons et les liens entre le système logistique (modes de gestion et d'organisation) et les flux de véhicules est assurée par des enquêtes spécifiques. Il est ainsi possible de définir des indicateurs d'occupation de la voirie par les véhicules en circulation et à l'arrêt sur un zonage. C'est l'option que nous avons choisie, pour plusieurs raisons développées ci-après.

TRANSPORTS DE MARCHANDISES EN VILLE : RECHERCHER LES « BONNES COMMANDES »

La complexité et l'hétérogénéité du transport de marchandises en ville sont dues à certaines caractéristiques-clés du mouvement urbain de marchandises, mouvement de biens et services qui rendent le transport urbain de marchandises et les problèmes qu'il engendre difficiles à modéliser. En effet, l'impact du transport de marchandises sur la ville prend plusieurs aspects :

- il conditionne la dynamique économique de chaque quartier. Un quartier enclavé ou mal desservi verra ses activités périlcliter ou changer de nature. Tout aménagement urbain, toute mesure réglementaire peut avoir un effet sur l'organisation de l'approvisionnement de la ville et par là même, sur sa vitalité économique ;
- l'occupation de la voirie par les véhicules, tant en circulation qu'à l'arrêt, peut provoquer des encombrements de la voirie qui réduisent la fluidité du trafic. De même, le trafic des voitures particulières crée une gêne importante sur l'approvisionnement urbain, qui peut amener les opérateurs à modifier leurs horaires de livraisons. La forte croissance du trafic urbain de ces dernières années entraîne des déséconomies de plus en plus importantes dans les agglomérations où la création de nouvelles infrastructures de transport est limitée par la rareté de l'espace ;
- la forte croissance du trafic automobile s'accompagne de nuisances environnementales de plus en plus importantes (bruit, pollution, sécurité), qui imposent à terme des mesures de réduction qui peuvent passer par une meilleure rationalisation de l'approvisionnement urbain.

Aussi, l'efficacité des mesures prises dans le cadre des TMV, dès lors qu'elles vont contraindre les entreprises à modifier leur comportement en matière de déplacement, dépendra d'une part, de

l'imagination et de l'inventivité des autorités chargés de les élaborer, d'autres part des moyens techniques et financiers qui leur seront consacrés, et enfin de la volonté politique des décideurs pour éviter un développement anarchique du secteur et les nuisances qu'il génère.

Nous présentons ici un modèle de simulation des effets de mesures prises à l'échelle d'une agglomération. Ces mesures concernent l'organisation logistique des entreprises, l'aménagement urbain (y compris la répartition des activités urbaines) et le cadre réglementaire du transport urbain de marchandises. Son originalité réside dans le fait qu'il s'appuie sur la notion de mouvement (opération de livraison ou d'enlèvement dans un établissement), sans passer par la contrainte de construction d'une matrice O/D de véhicules ou de marchandises qui, à notre avis et contrairement aux modèles de déplacements de personnes, manque d'opérationnalité en agglomération, du fait de la spécificité de l'approvisionnement urbain en tournées complexes avec ruptures de charges sur les plates-formes.

METHODOLOGIE

Cette démarche de modélisation à l'échelle d'une agglomération, fondée sur une série d'enquêtes quantitatives spécifiques, est menée par le Laboratoire d'Economie des Transports (Lyon). Nous disposons de bases de données consolidées (AMBROSINI *et al*, 1997) qui nous ont permis de construire un modèle de première génération dans le but de simuler la demande de transport de marchandises et les comportements de son principal vecteur de déplacement, les véhicules de livraison.

Principes de base

Ce que nous entendons par transport de marchandises en ville (TMV)

Nous entendons par TMV, l'ensemble des opérations qui servent à l'approvisionnement des activités d'une ville et de sa population. Il s'agit aussi bien de l'activité de distribution et d'enlèvement des établissements industriels, commerciaux ou tertiaires des secteurs privé et public que de l'approvisionnement des chantiers de voirie ou d'habitation, des opérations de déménagements (en France, 10% de la population et des activités urbaines se délocalisent chaque année), des transports des déchets, des services postaux, des livraisons à domicile et enfin, des déplacements d'achat des particuliers, qui représentent près du tiers des véhicules.km de l'ensemble (PATIER, ROUTHIER, 1997).

Les enjeux méthodologiques

Afin de prendre en compte la spécificité du TMV, tant du point de vue de la complexité du processus de sa génération que de ses impacts sur la ville, nous avons été amenés à considérer une unité de traitement adaptée au contexte, qui soit facilement identifiable et qui puisse répondre aux contraintes de simplification inhérentes à tout processus de modélisation. Un modèle économique quantitatif relève d'un processus de réduction de la réalité par de multiples approximations, mais sa finalité reste « d'expliquer la réalité ou d'agir sur elle » en s'appuyant sur le triptyque suivant :

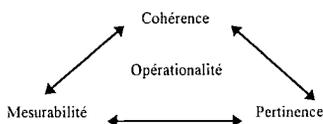


Figure 1 - un difficile équilibre

Nous avons été conduits à remettre en cause les modèles de trafic classiques utilisés dans le cadre des transports de personnes qui utilisent la notion d'Origine-Destination (O/D). En effet, deux raisons principales nous amènent à réfuter la pertinence des O/D des marchandises transportées et la mesurabilité des O/D des véhicules de livraison, pour décrire leurs parcours et la complexité de leurs modes d'organisation et de gestion. D'une part, les origines-destinations de marchandises ne tiennent pas compte des ruptures de charges, des changements de conditionnements qu'elles subissent. D'autre part, il nous paraît difficile de rendre compte des différents chargements et déchargements qui ont lieu au sein d'une même origine-destination de véhicule pour alimenter un modèle de trafic. Pour nous la demande de transport de marchandises peut être expliquée par la nature de la production, de la consommation et plus largement par le processus organisationnel qui génèrent la demande de transport de marchandises.

Une unité d'observation : le mouvement

Afin de saisir la demande de transport de marchandises en ville, nous avons orienté la collecte de données vers la mesure de la **génération des mouvements** par les établissements de l'agglomération. Nous entendons par mouvement, *l'événement décrit par l'opération de chargement ou de déchargement d'un véhicule de marchandises dans un établissement, l'occupation de la voirie par le véhicule à l'arrêt et le déplacement de véhicule correspondant.*

Cette unité d'observation présente plusieurs avantages : elle est parfaitement localisée dans l'espace et dans le temps, elle est facilement identifiable par les livraisons et les enlèvements qui sont réalisés dans chaque établissement. Elle permet de plus de localiser et de mesurer la durée des arrêts de chaque véhicule, selon les conditions de stationnement qui lui sont offertes. La connaissance de son insertion dans le parcours simple ou complexe d'un véhicule permet de prendre en compte le comportement du véhicule en circulation, comme nous le verrons plus loin. Nous pouvons ainsi associer **un nombre moyen de mouvements hebdomadaires** pour chaque établissement de l'agglomération, ce qui permet de calculer simplement le nombre de mouvements générés dans une zone donnée.

Des indicateurs de perturbation sur des zones

Les perturbations liées à l'occupation de la voirie par l'ensemble des véhicules de livraison sont ainsi calculables sur une zone et non sur un arc. Or, sur un réseau urbain, les ralentissements liés à la circulation ou au stationnement des véhicules ne dépendent pas seulement de la fluidité sur chaque arc mais dépendent surtout des conditions de croisements aux carrefours, ce qui n'est pas, à notre connaissance, modélisé dans les modèles de trafic ; exception faite de quelques développements récents en matière de modèles dynamiques d'affectation. De plus, la manifestation de la congestion sur un arc ne permet pas de mesurer l'impact de mesures autres que des aménagements d'infrastructure de transport. Or, comme nous l'avons souligné plus haut, le développement d'infrastructures de transport en zone urbaine est limité par la rareté de l'espace et n'est pas susceptible d'apporter de solution sur le plan environnemental - la création de nouvelles infrastructures entraîne inévitablement une forte induction de trafic et des nuisances qui l'accompagnent. Ainsi, *la densité d'occupation de la voirie par les véhicules à l'arrêt ou en circulation* dans une zone nous apparaît plus mesurable et plus pertinente en milieu urbain que des trafics O/D calculés par les modèles classiques sur les arcs d'un réseau de voirie.

Le concept de mouvement nous permet de cerner sur chaque zone d'une agglomération :

- ◆ le comportement des véhicules (durée et lieux de stationnement) ce qui permet de mesurer une *occupation moyenne de la voirie par ces véhicules à l'arrêt (illicite ou licite)* selon quatre types (voitures particulières <3,5t, camions porteurs, camions articulés) ;

- ◆ les tournées effectuées pour réaliser ces livraisons, ce qui permet de calculer les kilomètres parcourus par ces véhicules. Une *occupation de la voirie par les véhicules en circulation* ainsi qu'un *nombre de véhicules.km générés par une zone* peuvent être calculés ;
- ◆ la répartition spatiale des tournées effectuées, ce qui permet de *calculer la part du transit de zone (en véhicules.km)* qui complète ainsi le calcul de la génération de la demande de transport et plus particulièrement un flux de véhicules générés par l'activité « Marchandises en Villes » qui occupe la voirie dans chaque zone ;
- ◆ la quantité d'envois d'une zone vers une autre, qui provient de la connaissance des relations entre chargeurs et destinataires. Nous pouvons ainsi utiliser les liens structurels entre les activités émettrices et réceptrices de véhicules de marchandises de chaque zone, pour réaliser une distribution des envois d'une zone vers une autre ;

enfin, une *occupation instantanée de la voirie* par les véhicules de livraison, tant à l'arrêt qu'en circulation, peut être calculée par la connaissance des profils horaires des mouvements.

Ce parti pris méthodologique permet de satisfaire aux trois conditions d'opérationnalité d'un modèle de TMV : cohérence du concept et des objectifs du modèle, cohérence du concept avec la réalité du TMV, mesurabilité de toutes les grandeurs caractéristiques. En outre, elle autorise la comparaison de différents états du système de transports selon quatre types de commandes :

- ◆ la stratégie de localisation des entreprises résultant de l'évolution économique (division spatiale du travail, mondialisation des échanges), le phénomène d'étalement urbain ou encore le développement de pôles d'activité seront traduits par la macro-variable de commande « Localisation des activités » ;
- ◆ diverses options choisies par les établissements en ce qui concerne la logistique (modification des modes de gestion, rationalisation des tournées ...) seront désignées par la macro-variable « Système logistique » ;
- ◆ les mesures de « Réglementation urbaine » prises à l'échelle de l'agglomération correspondent aux contraintes sur les gabarits de véhicules, limitations des horaires d'accès à certaines zones, contraintes de stationnement ;
- ◆ les mesures liées à l'intervention publique sur l'aménagement urbain telles que nouvelles infrastructures ou création d'une plate-forme urbaine seront désignées sous le terme d'« Aménagement urbain ».

L'intérêt d'une approche spécifique de la demande de transports de marchandises en ville (TMV)

Les développements de la théorie de la demande de transports de marchandises en ville sont récents et probablement moins étendus que dans le cas du transports de personnes. Ce n'est pas tellement dû à une difficultés dans l'application - bien que, jusqu'à récemment, très peu de données relatives à l'acheminement des flux de marchandises en ville n'étaient aisément disponibles - mais cela est dû principalement au fait que l'attention au transports de marchandises et à la politique de planification urbaine qui lui est associée est apparue récemment.

La démarche de modélisation que nous présentons ici ne s'inscrit pas directement dans l'une des trois approches classiques de l'analyse de la demande de transports de marchandises en ville que sont l'approche micro-économique, l'approche d'interaction spatiale et enfin l'approche macro-économique.

La particularité de notre approche consiste à prendre en compte les principaux déterminants de la génération des mouvements et des liens entre les activités ainsi que les principaux impacts du TMV afin de permettre, à terme, de simuler les effets des différentes mesures envisagées pour remédier aux nuisances et aux dysfonctionnements du système de transport. Il s'agit donc bien de tenter d'intégrer les déplacements de marchandises dans la problématique urbaine, au même titre que les déplacements de personnes.

A cet égard, nous considérons qu'un modèle de transports de marchandises en ville, doit, à l'instar des modèles de transports de personnes, apporter des éléments sur la formation des flux de déplacement de marchandises, leur organisation et leur impact sur le système urbain dans son ensemble. Nous insistons sur le fait qu'il s'agit d'un modèle de simulation de décisions éminemment stratégique dans le sens où elles engagent le long terme et sont par nature multidimensionnelles. Les résultats du modèle peuvent servir de support à la discussion et doivent être considérés comme un maillon dans une réflexion dynamique entre les différents acteurs, institutionnels et économiques.

LE MODELE DE SIMULATION : FRETURB

Le modèle FRETURB s'appuie sur les résultats d'enquêtes spécifiques et produit des indicateurs sur un zonage prédéterminé. Il s'articule en quatre modules qui produisent chacun des indicateurs spécifiques.

Les variables de commande

Quatre groupes de variables de dynamisation du modèle ont été retenus :

1. la stratégie de localisation des entreprises résultant de l'évolution économique (résultant de la division spatiale du travail, de la mondialisation des échanges), le phénomène d'étalement urbain ou encore le développement de pôles d'activité seront traduits par la macro-variable de commande « *Localisation des activités* »,
2. les diverses options choisies par les établissements en ce qui concerne la logistique (modification des modes de gestion, rationalisation des tournées ...) seront désignées par la macro-variable « *Système logistique* »,
3. les mesures de « *Réglementation urbaine* » prises à l'échelle de l'agglomération correspondent aux contraintes sur les gabarits de véhicules, limitations des horaires d'accès à certaines zones, contraintes de stationnement,
4. les mesures liées à l'intervention publique sur l'aménagement urbain telles que nouvelles infrastructures ou création d'une plate-forme urbaine seront désignées sous le terme d'« *Aménagement urbain* ».

La génération des mouvements

Le nombre de livraisons ou enlèvements sur chaque zone z , $N_{bmv}(z)$, est la somme pondérée par le nombre d'établissements de la zone, du nombre de livraisons ou enlèvements sur tous les types d'établissements i dans la zone z :

$$N_{bmv}(z) = \sum_i (n_{betab}(i,z) * n_{bmv}(i))$$

où $n_{bmv}(i)$ désigne le nombre de mouvements générés par un établissement de type i et $n_{betab}(i,z)$ représente le nombre d'établissements de type i dans la zone z .

Les mouvements sont ensuite qualifiés par les conditions de stationnement, les véhicules utilisés, les conditions de livraisons, les temps de livraison, les niveaux de desserte, les profils horaires des livraisons, les distances moyennes parcourues suivant le mode de gestion et le mode d'organisation des opérateurs de transport, l'usage des plates-formes selon les chaînes logistiques liées aux diverses activités.

Les invariants du modèle

- ◆ Une agglomération engendre deux fois plus de réceptions que d'expéditions de marchandises.
- ◆ Le nombre de mouvements est fortement lié à l'activité.

- ◆ La densité des mouvements varie fortement dans le temps avec ses « heures de pointe » bien connues des spécialistes. Il conviendra donc de caler une relation entre le nombre de mouvements et les heures selon des macro zones, vérifier cette répartition par plage horaire sur le commerce de détail par exemple qui domine nettement la création de mouvements en ville. Il existe peu de variations journalières ou mensuelles.
- ◆ La répartition des parcours et des mouvements est fortement dépendante du mode de gestion (un tiers des mouvements sont généralement effectués en compte d'autrui).
- ◆ La répartition des mouvements est très fortement liée au mode d'organisation (les trois quart des mouvements sont généralement effectués en tournées, le quart en trace directe).
- ◆ Le type de véhicule utilisé dépend des activités desservies.
- ◆ Le type de véhicule utilisé selon l'activité varie en fonction du type de gestionnaire (compte propre destinataire et expéditeur, compte d'autrui).
- ◆ Les distances couvertes et le nombre d'arrêts effectués lors des parcours sont liés à la fois au mode de gestion et au mode d'organisation

Le calcul de la durée de stationnement sur voirie

La part du stationnement sur voirie dépend de l'environnement de chaque établissement. Elle est calculée pour chaque zone z , par la quantité $\%stat(z)$. La durée moyenne de stationnement sur voirie est calculée pour chaque type d'activité et chaque type de véhicule : $duréeMoy(j,v)$. L'emprise au sol de chaque type de véhicule est notée $Emprise(v)$. Où : j désigne le type d'activité et v le type de véhicule (voiture particulière ou fourgonnette, camionnette de moins de 3,5 t., camion porteur, camion articulé)

La durée d'occupation de la voirie par les véhicules de livraison à l'arrêt dans une zone z (pour des raisons de livraison ou d'enlèvement) est obtenue ainsi :

$$DuréeArret(z) = (z \sum_j \sum_v (nbtab(z,j,v) * nbmvt(j,v) * duréeMoy(j,v)) * Emprise(v)) * \%stat(z)$$

Cette durée est calculée en heures* unité VP par zone, en une semaine. De même, une occupation instantanée de la voirie par les véhicules de livraison en stationnement illicite peut en être déduite.

La fonction utilisée met en relation le nombre et la durée moyenne des arrêts dans la tournée et la durée moyenne d'un arrêt de cette tournée :

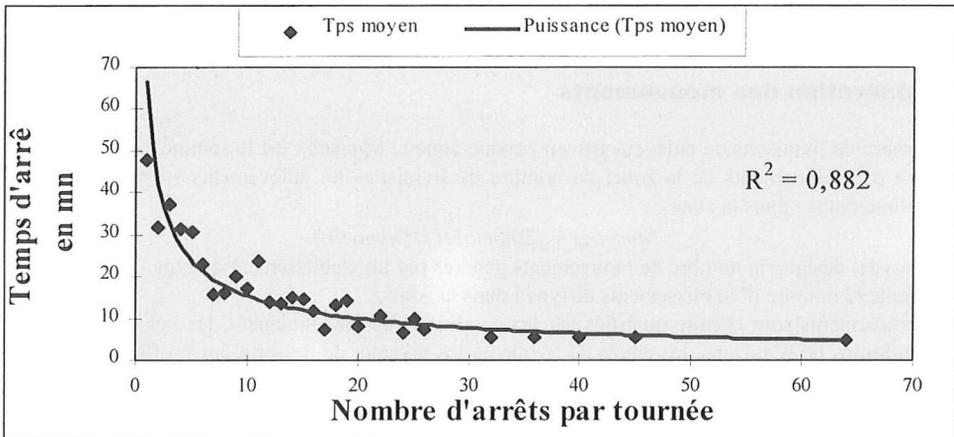


Figure 2 - Durée moyenne d'un arrêt selon la taille de la tournée.

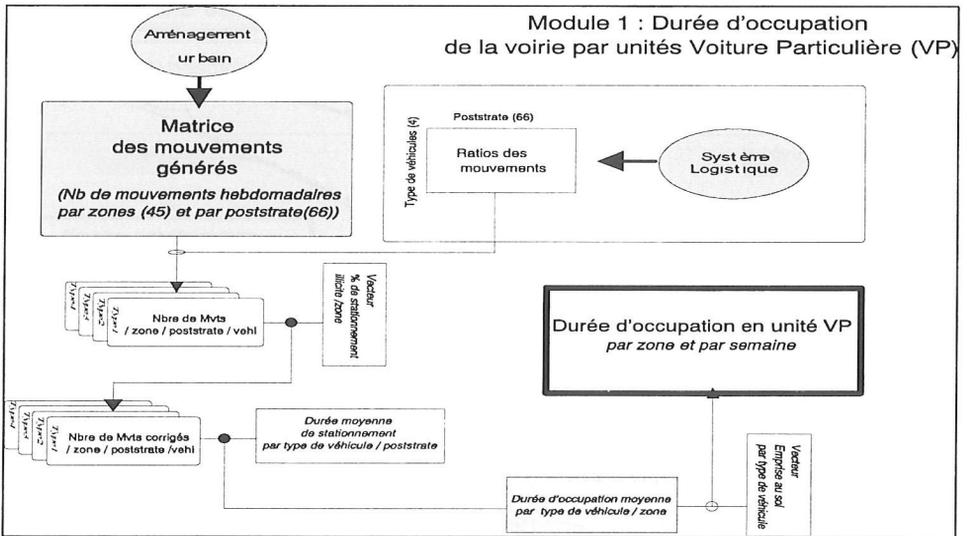


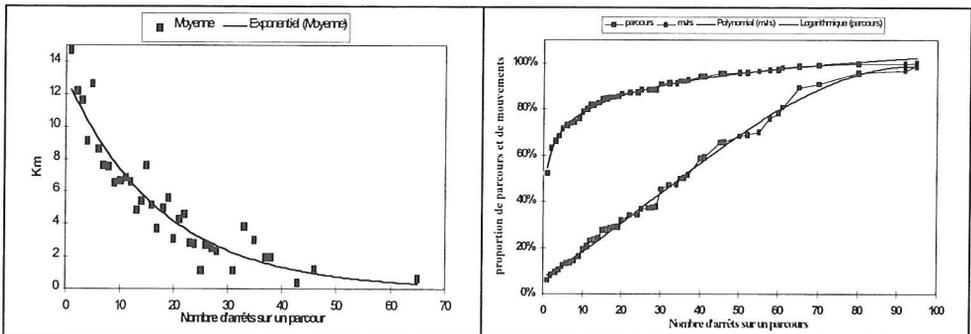
Figure 3 -Durée d'occupation de la voirie par des voitures particulières.

Le calcul de l'occupation de la voirie par les véhicules en circulation

Les flux de transport de marchandises en ville ainsi que leurs caractéristiques (occupation de la voirie en kilomètres parcourus et en durée) sont expliqués par trois principaux facteurs :
 le type d'activité desservie,
 le mode de gestion (compte d'autrui, compte propre destinataire et expéditeur),
 le mode d'organisation des parcours, taille des tournées, distance entre deux arrêts, vitesse des trajets).

Cette occupation est exprimée par zone en *véhicules.km - équivalents VP*, ainsi qu'une occupation de la voirie en *heures équivalents VP*. Deux types de trafic sont calculés : le transit de zone et le trafic généré.

Les principales relations fonctionnelles utilisées dans ce module sont les suivantes :



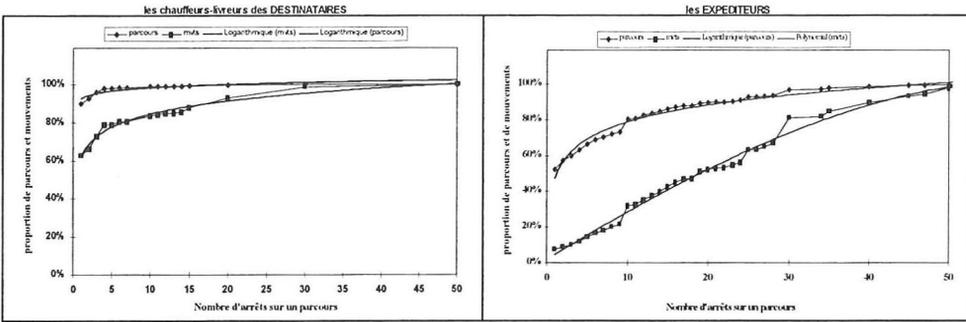


Figure 4 - Les principales relations fonctionnelles du module 2

La qualité des ajustements polynomiaux ou exponentiels des graphiques sur les modes de gestion est particulièrement bonne ($R^2 > 0,95$), ce qui permet d'énoncer des règles pertinentes de comportement des différents types d'acteur (entreprises de transport, expéditeurs et destinataires)

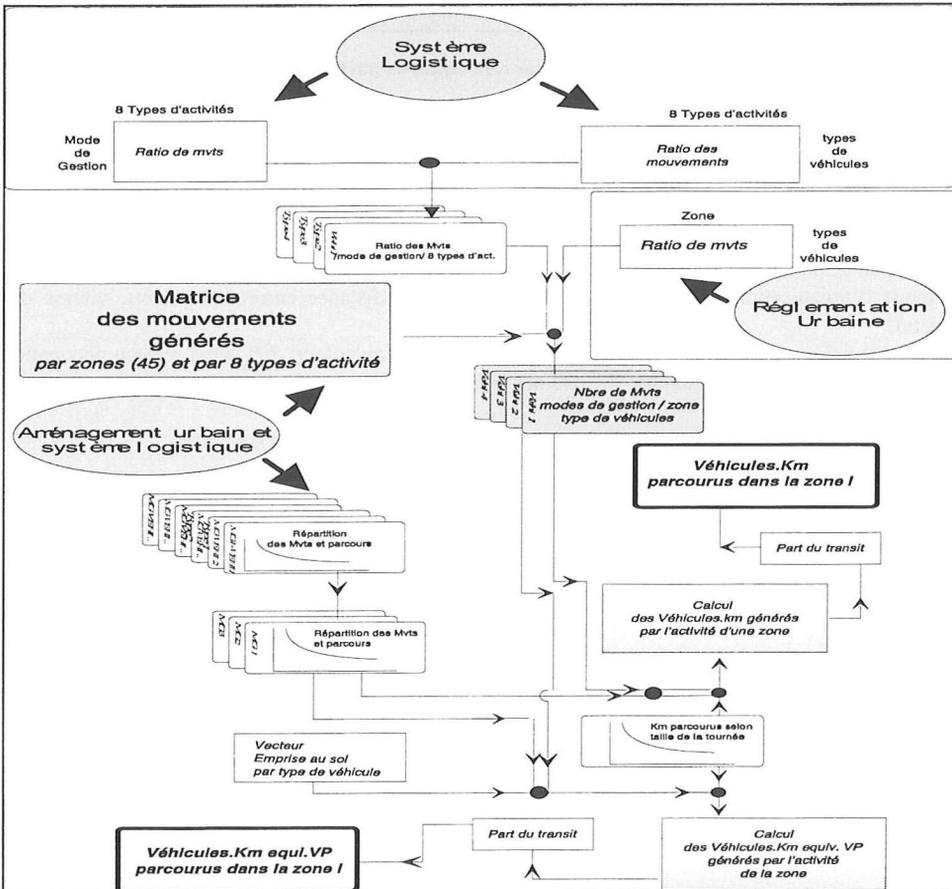


Figure 5 - Occupation de la voirie par les véhicules en circulation

Le calcul d'une occupation instantanée de la voirie en heure de pointe

En intégrant les rythmes journaliers et saisonniers, on obtient une occupation instantanée de la voirie par les véhicules en stationnement et en circulation.

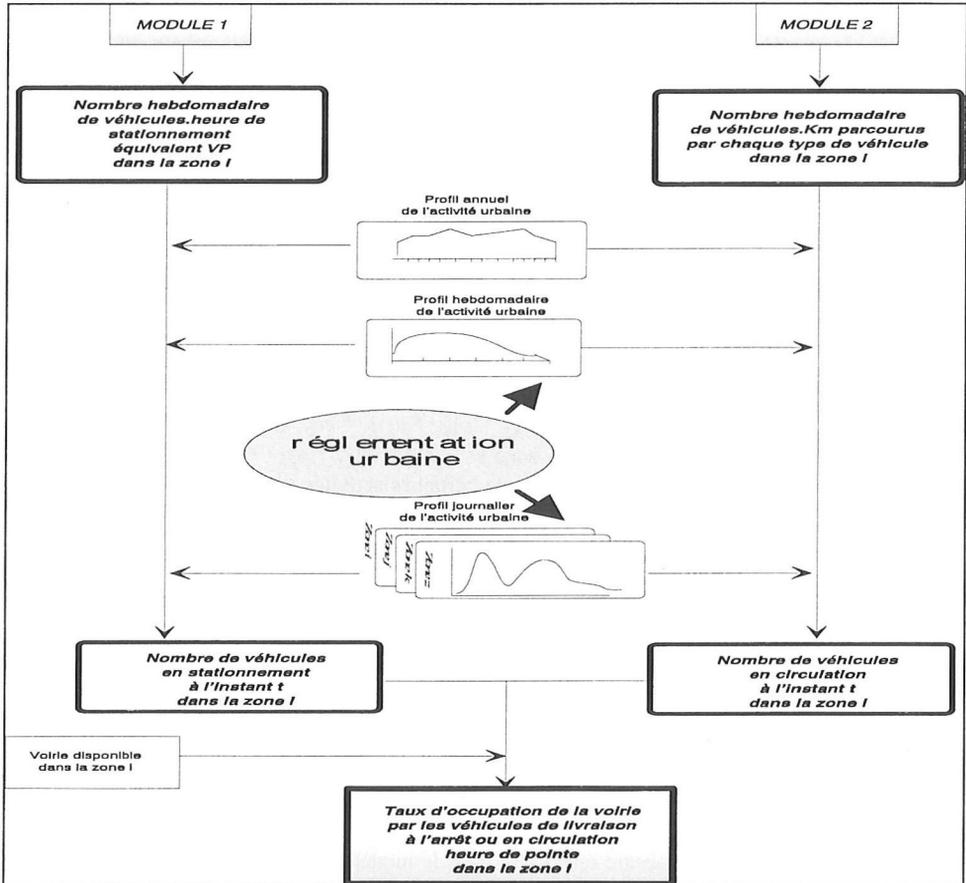


Figure 6 - Occupation instantanée de la voirie

Ce module permet de mesurer dans chaque période de la journée, le niveau d'occupation de la voirie la plus forte dans chaque zone. C'est donc un outil de diagnostic des dysfonctionnements du système des TMV qui permet de cibler les mesures incitatives ou réglementaires pour y remédier.

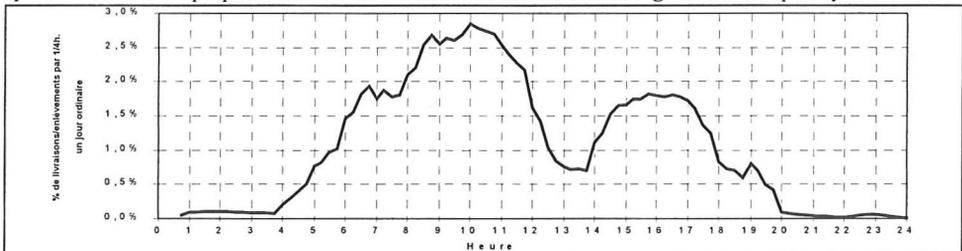


Figure 7 - Rythmes horaires des livraisons/enlèvements dans l'agglomération de Bordeaux

Le calcul d'une distribution des échanges entre zones

A partir d'une enquête sur les tournées, le module 2 permet de produire une génération de l'occupation de la voirie par les véhicules en circulation. Celle-ci peut être dynamisée par la connaissance des liens structurels entre les activités émettrices et réceptrices de véhicules de marchandises de chaque zone. Une connaissance détaillée de ces relations accroît les capacités de simulation du modèle, par exemple pour simuler les effets d'aménagements urbain ou logistiques (implantation d'une plate-forme urbaine, délocalisation de certaines activités etc.) sur la formation des flux.

Pour ce faire, nous calculons le nombre de mouvements réalisés dans les établissements d'une zone z' , touchés par l'ensemble des tournées émises par les établissements d'activité k situés dans une zone z . La connaissance de la répartition des activités desservies par une activité k permet d'établir qu'une tournée émise par l'activité k dessert une activité k' avec la probabilité $p_{kk'}$, soit m_k , le nombre moyen de mouvements réalisés dans un établissement de type k' et $n_{z'k'}$ le nombre d'établissements de type k' dans une zone z' , soit $P_{kz} = n_{zk} * m_k / \sum (n_{zk} * m_k)$ désigne la part de la zone z dans la quantité de mouvements générés par l'activité k dans l'agglomération.

le nombre de réceptions des établissements de type k' de la zone z' , touchés par l'ensemble des tournées émises par un établissement de la zone z et d'activité k est estimé par : $P_{kz} * n_{z'k'} * p_{kk'} * m_k$. Le nombre de réceptions de la zone z' à partir d'une tournée émise par les établissements d'activité k de la zone z est estimé par : $k' \sum (P_{kz} * p_{kk'} * n_{z'k'} * m_k)$. On en déduit aisément le flux de marchandises émis par la zone z vers la zone z' : $k \sum k' \sum (P_{kz} * p_{kk'} * n_{z'k'} * m_k)$. Ce résultat permet de mesurer l'effet de la délocalisation de certaines activités d'une zone à une autre sur la distribution des flux de marchandises zone à zone.

Les mesures et leurs effets

Il est possible de simuler dans ce modèle, les effets de trois types de variables de commande :

Les mesures de **planification urbaine**, agissent sur la localisation des activités et tiennent compte de la répartition des mouvements par type d'activité et mode de gestion. On observe une spécificité d'intervention des gestionnaires selon le domaine d'activité. Dans le cadre de la **logistique des entreprises**, le modèle utilise une spécificité d'intervention des gestionnaires selon le domaine d'activité. Dans le cadre de la **réglementation urbaine**, le modèle joue sur le nombre de mouvements réalisés selon le type de véhicule dans chaque zone selon la période d'action de la mesure.

Les conséquences de chaque mesure opératoire dans le modèle se traduisent par une modification des indicateurs de sortie du modèle, à savoir l'occupation de la voirie par les véhicules à l'arrêt et en circulation (durées d'occupation de la voirie, nombre de véhicules.km par zone). L'aménageur pourra d'autant mieux choisir sa politique qu'il aura connaissance des effets directs et indirects de chaque mesure.

Le tableau suivant récapitule succinctement la chaîne de causalités qui permet d'expliquer la variation de ces indicateurs au sein du modèle :

Table 1 - Chaîne de causalités et impact sur les Indicateurs

ACTION	EFFET PRINCIPAL SUR	EFFET SECONDAIRE SUR :	EFFET DE 3 ^{EME} NIVEAU :
SYSTEME LOGISTIQUE			
(1) Choix d'un véhicule adapté à la distribution urbaine	la taille moyenne des tournées	la proportion des mouvements par type de véhicule pour les types d'activités concernées	

ACTION	EFFET PRINCIPAL SUR	EFFET SECONDAIRE SUR :	EFFET DE 3^{EME} NIVEAU :
(2) Encourager la professionnalisation du secteur (augmenter la part du compte d'autrui)	la taille moyenne des tournées		
(3) Normalisation du conditionnement des marchandises	le taux de remplissage des véhicules	la répartition des tournées selon leur taille et le mode de gestion.	la durée d'arrêt des véhicules sur voirie
(4) Concentration du secteur du TMV	la répartition des tournées selon leur taille.		
PLANIFICATION URBAINE			
(5) Création de zones d'activité	le nombre de mouvements par zones	la distribution des flux de marchandises zone à zone	
(6) Création de plates-formes urbaines	le nombre de mouvements par zones	la répartition des tournées selon leur taille et le mode de gestion.	la distribution des flux de marchandises zone à zone
(7) Mesures incitatives auprès des opérateurs de transport	Cf. (1), (2), (3) or (4)		
REGLEMENTATION URBAINE			
(8) Contrôle des accès au centre-ville	le rythme journalier des livraisons par zones	le nombre de mouvements par zones	délocalisation d'entreprises (effet de long terme)
(9) Rationalisation du stationnement et des emplacements de livraison	la part de stationnement illicite sur voirie		

Une politique de transport consiste à combiner de manière cohérente certaines de ces mesures entre elles. Le modèle permet de comparer l'impact de plusieurs combinaisons de mesures afin de mettre en évidence la synergie ou les contradictions inhérentes aux différentes politiques simulées.

Un tel modèle permet donc de simuler les effets attendus des principales mesures envisagées sur la formation des flux de véhicules de marchandises. Il permet de plus d'alimenter les modèles de consommation énergétique, d'émission et d'immission de polluants, pour obtenir des indicateurs relatifs au développement soutenable de l'activité urbaine : consommation d'espace, consommation d'énergie, nuisances environnementales (pollution, bruit).

Cependant, plusieurs difficultés restent à lever : les mesures envisagées impliquent de nombreux acteurs, institutionnels et professionnels, dont les capacités de réactions ne sont pas intégrées dans le modèle. Par exemple, l'impact de telle ou telle mesure incitative ou réglementaire est fortement conditionnée par la réaction des acteurs économiques qui, pour s'adapter à la nouvelle réglementation, peuvent opter pour une stratégie d'évitement, voire de délocalisation.

C'est pourquoi chaque mesure envisagée doit être accompagnée d'une série d'hypothèses de comportement des acteurs, afin de permettre une mise en œuvre pragmatique des simulations.

Les prolongements prévus de cette démarche de simulation sont de deux ordre :

- ◆ prendre en compte les déplacements de véhicules autres que ceux qui sont générés par les échanges de biens entre les différents établissements des secteurs économiques de la sphère publique ou privée, comme l'approvisionnement des chantiers, les déménagements, ainsi que les déplacements d'achat des particuliers qui représentent plus de 25% des véhicules.km - équivalents VP du total des flux d'approvisionnement urbain (PATIER, ROUTHIER, 1998)
- ◆ effectuer les tests de sensibilité du modèle à chacun des types de mesures.
- ◆ mesurer les effets conjoints des différents jeux de mesures qui peuvent accompagner les scénarios de politique globale envisagés.

REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient particulièrement J.G. Dufour, qui a conçu le programme d'études pluri-annuel national dans lequel s'inscrit cette recherche, ainsi que l'ensemble des membres du LET.

BIBLIOGRAPHIE

Ambrosini, C., Patier, D., Routhier J.L., (1997) Transport de marchandises en ville, enquête quantitative à Bordeaux, **rapport final**, DRAST, LET, Lyon.

ADEME, CERTU (1998) **L'intégration des marchandises dans les PDU**. Editions du CERTU, Paris.

Eriksson, J.R., Bjöketun, U., Edwards, H., Agren B., (1997) NÄTRA - An Urban Tradend Industry Transport Analysing Model, **working paper**, Swedish National Road and Transport Research Institute.

Commission Européenne des Ministres des Transports (1984), Systèmes de distribution des marchandises dans les aires urbaines, **Table ronde n°61 de la CEMT**, Paris.

Dufour, J.G. (1994), Une exploitation de l'enquête « chargeurs » de l'INRETS. **Dossier du CERTU**, Ministère de l'équipement, du transport et du tourisme, France.

Eriksson J.R., (1996) Urban freight transport forecasting - an empirical approach, **Urban Transport and the Environment II**, CM Publications, Southampton.

Lam, W., Lo, H.P. (1991) Estimation of origin-destination matrix from traffic counts : a comparison of entropy maximizing and information minimizing models, **Transportation Planning and Technology 16 : 2**, 85-104.

Meyburg, A., Stopher, P. (1984), Transport problems as perceived by Inner City Firms, **Transportation Vol. 12**, 225-241.

Nicolaisen, T. (1997), City Freight Transport Modelling in Oslo and Akerkus, **COST 321 Meeting**, Zürich, april 1997.

Ogden, K. (1977), Modelling Urban Freight Generation, **Traffic engineering and Control Vol. 18 N° 3**, 106-109.

Ogden, K. (1992), **Urban Goods Transportation : A Guide to Policy and Planning**. Ashgate, Hants.

Patier, D., Routhier, J.L., (1998), Livraisons de marchandises en ville, **revue TEC n° 145**, 10-24.

Aubert, P.L Routhier, J.L., (1997) An attempt at modelisation of goods Transport in urban areas, **EUCO-COST 321/7/96**, Group B, European Commission, Brussels.

Visser, J.G., (1997), Modelling freight transport in cities, **COST 321 Meeting**, Zürich, april 1997.