Optimisation d'un système multimodal de transport de marchandises

Marcella Autran Burlier Drummond

11e Congrés des Doctorants 2010
EDSYS (École Doctorale Systèmes)
6 et 7 mai, Toulouse

Optimisation d'un Système Multimodal de Transport de Marchandises

Congrés des Doctorants EDSYS 2010

Marcella Autran Burlier Drummond (`marcella.drummond@enac.fr`)
EDSYS, Toulouse
ENAC, Toulouse

Thèse encadrée par : Félix Mora-Camino(LARA-TA/ENAC) et Catherine Mancel(LARA-TA/ENAC)

Résumé *Dans un contexte où le service de transport de marchandises devient de plus en plus important, ce travail de recherche s'intéresse à l'optimisation de l'organisation des systèmes multimodaux de transport de marchandises qui font appel de façon significative au transport aérien. Cet article présente un modèle pour la prédiction à moyen-terme des niveaux d'offre de service de frêt multimodal, dans lequel les niveaux et la distribution de la demande dépendent des prix de transport.*

1. Introduction

Cette recherche s'intéresse à l'optimisation de l'organisation des systèmes multimodaux de transport de marchandises qui font appel de façon significative au transport aérien. Au cours des dernières décennies de nombreuses études dans le domaine de la Recherche Opérationnelle et de l'Aide à la Décision ont eu trait aux problèmes de planification des activités de transport de marchandises. Ce problème a été abordé suivant différentes approches mettant en avant des caractéristiques diverses (choix d'itinéraires, localisation de dépôts, choix de flotte, contraintes temporelles, gestion des stocks, aspects stochastiques, etc.) néanmoins en ce qui nous concerne, peu de travaux se sont focalisés sur le transport aérien comme élément central d'un système intermodal de transport de marchandises. Par ailleurs, dans la majorité des études consultées, l'un des éléments de la prise de décision, la demande, est considérée figée, ce qui limite la prise en compte de la concurrence entre les différents agents économiques participant au transport.

2. Problématique

Cette thèse se basant sur de la théorie des graphes et des réseaux (qui mettent en œuvre des flux) propose d'abord une modélisation de l'ensemble du système multimodal de transport de marchandises qui présente un compromis acceptable entre le degré de complexité du modèle et son degré de réalisme. Celle concerne donc :

- La modélisation des flux de différents types de marchandises entre leurs origines et leurs destinations.
- La modélisation des flottes de véhicules et des équipements nécessaires au transport, au transfert et au stockage de marchandises.
- La prise en compte des principaux coûts et délais associés à l'opération de ce système.
- La formulation de contraintes spatiales et temporelles.
- La modélisation des facteurs influant sur les niveaux de demande de transport.
- L'identification des principaux paramètres susceptibles de donner lieu à la prise de décision (les variables de décision)

Cette approche de modélisation doit être compatible avec une prise de décision s'exerçant sur un horizon de moyen-terme, qui se traduira par un ou des problèmes d'optimisation, de façon à résoudre les principaux problèmes d'organisation d'un système multimodal de transport de marchandises où le transport aérien occupe une place centrale.

L'approche de modélisation proposée doit permettre de formuler, suivant les scénarios d'entreprise retenus, différents types de problèmes d'optimisation :

- Optimisation monocritère d'un profit ou d'un coût de transport associé à tout le secteur ou une partie de celui-ci.
- Optimisation multicritère associé à des

considérations stratégiques concurrentes.
- Optimisation multi-niveau associée à des situations de dépendance entre entreprises opérant le système.

Dans cet article, toutes les étapes citées ci-dessus ne sont pas totalement finalisées. On se concentre ici principalement sur le développement d'un outil de prédiction à moyen terme des niveaux d'offre de service de transport de marchandises pour un système multimodal. L'estimation des niveaux d'offre et de la demande future sont des problèmes cruciaux pour la planification nécessaire aux investissements dans les terminaux, dans les réseaux de transport et dans les flottes.

Selon l'horizon considéré, on peut distinguer trois niveaux de planification des systèmes de transport [CL97] : La planification stratégique - qui s'intéresse à la structure du système de transport-, la planification tactique - qui s'intéresse au dimensionnement de flottes et à la tarification - et la planification opérationnelle - qui s'occupe de l'affectation et de la programmation des flottes. Nous nous intéressons ici à la planification tactique.

Afin de limiter la complexité globale des problèmes et compte tenu de l'horizon choisi pour la prise de décision, les aspects dynamiques et les aspects stochastiques ne seront pas abordés dans cette étude.

Principales hypothèses considérées :
- Une approche statique - Qui écarte l'influence du temps.
- Un système de transport multimodal sans intermodalités - Dans cette première étude, un système de transport multimodal est un système où coexiste deux ou plusieurs moyens de transport de marchandises. Par contre, ces moyens de transport ne sont pas complémentaires, mais concurrents. On suppose qu'une marchandise n'utilise qu'un mode de transport de son origine à sa destination.
- Des niveaux de demande réactifs aux coûts de transport - Une des difficultés principales de cette étude résulte de l'interaction entre les niveaux d'offre de service de transport et les niveaux de demande pour celui-ci. Il s'agit donc d'estimer la demande à tarifs de transport donnés et d'estimer les coûts de transport à niveau de demande donnés.
- Les coûts unitaires de transport par modalité et produit sont supposés connus - Chaque produit k a un coût de transport différencié par sa modalité de transport.
- Les niveaux d'offre et de demande potentielle locale sont supposés connus - Le volume de produit de type k qui sort de certaines origines et le volume de produit de type k que arrive aux destinations sont supposés connus.
- Les interactions avec le transport de passagers ne sont pas considérées ici.

3. Prévision de la demande de marchandises

Pour modéliser la prévision de la demande, il s'agira de prévoir la répartition modale des flux de chaque type de marchandise entre chaque paire Origine - Destination et minimiser le coût total de transport du produit k, sous les contraintes d'origine-destination.

Soit O_i^k l'offre localisé du produit k à l'origine i pour tout i dans $\{1,\ldots,N\}$ et D_j^k la demande localisé du produit k à la destination j, pour tout j dans $\{1,\ldots,N\}$, ceux-ci, sous les contraintes de conservation globale du produit k.

$$O_i^k, i \in \{1,\ldots,N\}, \qquad D_j^k, j \in \{1,\ldots,N\} \tag{1}$$

$$\sum_{i=1}^{N} O_i^k = \sum_{j=1}^{N} D_j^k = P^k \tag{2}$$

Nous considérons connus les niveaux d'offre et de demande potentiels par produits pour la période considérée, ce qui signifie que les quantités maximales de produit qui vont circuler dans le système sont connus.

On désigne par T_{ij}^k la demande du produit k entre l'origine i et la destination j. Les T_{ij}^k devront satisfaire aux contraintes d'origine et de destination :

$$\sum_{j=1}^{N} T_{ij}^k = O_i^k \qquad \sum_{j=1}^{N} T_{ji}^k = D_i^k \tag{3}$$
$$i = 1 \quad à \quad N \qquad k = 1 \quad à \quad K$$

Comme chaque mode de transport de marchandise a ses caractéristiques spécifiques, on peut considérer aussi T_{ij}^{km} le volume de la demande du produit k, de i à j, qu iutilise la modalité m et on a :

$$T_{ij}^k = \sum_{m \in M_{ij}} T_{ij}^{km} \tag{4}$$

Pour la répartition modale des flux de chaque type de marchandise entre chaque paire Origine - Destination on adopte ici le modèle Logit [Kan83] , classique en prévision de la demande de transport.

$$T_{ij}^{km}(\pi_{ij}^{km}) = T_{ij}^k\left(\frac{e^{-\lambda_{ij}^{km}\pi_{ij}^{km}}}{\sum_{\mu \in M_{ij}} e^{-\lambda_{ij}^{k\mu}\pi_{ij}^{k\mu}}}\right) \tag{5}$$
$$m \in M_{ij}$$

où les π_{ij}^{km} sont des coûts moyens de transport du produit k entre i et j, par la modalité m et les λ_{ij}^{km} sont des paramètres positifs caractéristiques du comportement des décideurs dans ce domaine.

On peut procéder aussi à l'estimation de la distribution à coût minimum de la demande sur le réseau de transport en résolvant le problème de programmation linéaire :

$$min_{T_{ij}^{km}} \sum_{i=1}^{N}\sum_{j=1}^{N}\sum_{m\in M_{ij}} \pi_{ij}^{km} T_{ij}^{km} \tag{6}$$

sous les contraintes d'origine-destination :

$$\sum_{j=1}^{N}\sum_{m\in M_{ij}} T_{ij}^{km} = O_i^k \qquad i = 1 \text{ à N} \tag{7}$$

$$\sum_{i=1}^{N}\sum_{m\in M_{ij}} T_{ij}^{km} = D_j^k \qquad j = 1 \text{ à N} \tag{8}$$

$$T_{ij}^{km} \geq 0, \qquad m \in M_{ij}, \qquad i,j = 1 \text{ à N} \tag{9}$$

dont la solution $\tilde{T}_{ij}^{km}$, par agrégation intermodale, nous donne les matrices de distribution $\tilde{T}_{ij}^{k}$:

$$\tilde{T}_{ij}^{k} = \sum_{m\in M_{ij}} \tilde{T}_{ij}^{km} \tag{10}$$

Combinant les deux effets, on définit $\hat{T}_{ij}^{km}$, qui considère à la fois l'effet des différences de coût entre les paires Origine-Destination et la concurrence entre modes sur une même liaison.

$$\hat{T}_{ij}^{km} = \tilde{T}_{ij}^{k} \frac{e^{-\lambda_{ij}^{km}\pi_{ij}^{km}}}{\sum\limits_{\mu\in M_{ij}} e^{-\lambda_{ij}^{k\mu}\pi_{ij}^{k\mu}}} \tag{11}$$

$$m \in M_{ij}, \qquad i,j = 1 \text{ à N}$$

Notons que, les contraintes d'origine-destination doivent être satisfaites pour que la solution ainsi obtenue soit réalisable. En général, les $\hat{T}_{ij}^{km}$ définits par l'equation (11) ne permettent pas de vérifier ces contraintes. Ainsi, les distributions obtenues, que nous qualifions de " distributions a priori " ne satisfont pas nécessairement aux contraintes de distribution des flux de produits au niveau des origines-destinations.

Pour tenir compte des contraintes d'origine-destination, on adopte une approche de maximisation de l'entropie conditionnelle, qui permet de trouver des distributions satisfaisant ses contraintes mais restant proches des distributions a priori. Ce problème se formule comme suit :

$$max - \sum_{i=1}^{N}\sum_{j=1, j\neq i}^{N}\sum_{m\in M_{ij}} T_{ij}^{km} \ln(\frac{T_{ij}^{km}}{\hat{T}_{ij}^{km}}) \tag{12}$$

sous contraintes :

$$\sum_{j=1}^{N}\sum_{m\in M_{ij}} T_{ij}^{km} = O_i^k \qquad \sum_{j=1}^{N}\sum_{m\in M_{ji}} T_{ij}^{km} = D_i^k \tag{13}$$

$$i = 1 \text{ à N} \qquad k = 1 \text{ à K} \tag{14}$$

$$T_{ij}^{k} \geq 0, \qquad i,j = 1 \text{ à N}, \qquad i \neq j \tag{15}$$

Comme le problème d'optimisation ci-dessus est convexe, on associe à ce problème un lagrangien, où les α_i et les β_i sont les variables de Lagrange :

$$L = - \sum_{i=1}^{N}\sum_{j=1, j\neq i}^{N}\sum_{m\in M_{ij}} T_{ij}^{km} \ln(\frac{T_{ij}^{km}}{\hat{T}_{ij}^{km}}) \tag{16}$$

$$+ \sum_{i=1}^{N} \alpha_i (\sum_{j=1, j\neq i}^{N}\sum_{m\in M_{ij}} T_{ij}^{km} - O_i^k)$$
$$+ \sum_{j=1}^{N} \beta_i (\sum_{i=1, j\neq i}^{N}\sum_{m\in M_{ij}} T_{ij}^{km} - D_j^k)$$

Ainsi, écrivant pour ce problème convexe les conditions d'optimalité du premier ordre, on peut en déduire la structure analytique des distributions solutions du problème et montrer que les distributions solution correspondent à des modèles de type gravitationnel :

$$\frac{\partial L}{\partial T_{ij}^{km}} = 0 \quad i = 1 \text{ à N}, \quad j = 1 \text{ à N}, \quad i \neq j \tag{17}$$

$$T_{ij}^{km^*} = \hat{T}_{ij}^{km} e^{-(1-(\alpha_i+\beta_i))} \tag{18}$$

$$i = 1 \text{ à N}, \quad j = 1 \text{ à N}, \quad i \neq j, \quad m \in M_{ij} \tag{19}$$

avec

$$\sum_{j=1, j\neq i}^{N}\sum_{m\in M_{ij}} \hat{T}_{ij}^{km} e^{(-1+\alpha_i^p+\beta_j^{p-1})} = O_i^k \tag{20}$$

$$i = 1 \text{ à N}$$

$$\sum_{i=1, i\neq j}^{N}\sum_{m\in M_{ij}} \hat{T}_{ij}^{km} e^{(-1+\alpha_i^p+\beta_j^{p})} = D_j^k \tag{21}$$

$$j = 1 \text{ à N}$$

Les 2N valeurs des variables de Lagrange sont, pour chaque produit, obtenues comme solutions des équations non linéaire (a) et (b). Une extension de l'algorithme de Furness [FF62] peut être utilisée pour permettre d'obtenir une solution à l'estimation des variables de Lagrange α_i et β_j. Cet algorithme présente une convergence géométrique de façon à accepter la méthode géométrique primale.

Finalement, le modèle de prévision de demande de service de transport par produit qui est proposé et qui prend en compte, de façon plausible, les effets des coûts de transport aussi bien que les équilibres inter régionaux entre volumes de trafic, est donné par :

$$\hat{T}_{ij}^{km} = \tilde{T}_{ij}^{k} \frac{e^{-\lambda_{ij}^{km}\pi_{ij}^{km}}}{\sum\limits_{\mu \in M_{ij}} e^{-\lambda_{ij}^{k\mu}\pi_{ij}^{k\mu}}} e^{-(1-(\alpha_i+\beta_i))} \qquad (22)$$

$$m \in M_{ij}, \qquad i,j = \text{ 1 à N}$$

4. Modélisation de l'Offre

On considère que l'offre de transport de marchandise est composée principalement des différents modes de transport, des réseaux opérés, des flottes mises en œuvre et des tarifs pratiqués.

En effet, les trois entrées nécessaires à l'optimisation de l'offre sectorielle de transport de marchandise sont déjà prêt : (1) la structure du réseau multimodal ; (2) Les coûts d'exploitation et ; (3) Les estimées des niveaux de demande par produit, par mode et par Origine-Destination.

Il s'agit alors d'optimiser le résultat économique du secteur de transport de marchandises, où on contemple les recettes et les coûts opérationnels en considérant les flux de véhicules par modalité f_{ij}^m, les flux de marchandises effectivement hors portés θ_{ij}^{kmn} et les tarifs pratiqués π_{ij}^{kmn}.

$$max_{f_{ij}^m, \pi_{ij}^{kmn}, \theta_{ij}^{kmn}} \sum_{(i,j)\in G} \sum_{m \in M_{ij}} \sum_{n=1}^{N_{ij}^m} (\pi_{ij}^{kmn}\theta_{ij}^{kmn})$$

$$/(1+\tau_r) - \sum_{m=1}^{M} (c_{cf}^m + c_{cv}^m F^m + \sum_{(i,j)\in G_m} c_{ij}^{mcv} f_{ij}^m) \qquad (23)$$

Sous des contraintes relatives à la flotte de transport :

$$\sum_{(j,i)\in G_m} f_{ji}^m = \sum_{(i,k)\in G_m}^{N_m} f_{ik}^m \qquad i \in G_m, \quad m \in M \qquad (24)$$

$$\sum_{(i,j)\in G_m}^{N_m} f_{ij}^m \leq D_m F_m \qquad (25)$$

$$\sum_{(i,j)\in G_m} f_{ji}^m \leq C_j^m \qquad j \in \tilde{G}_m, \quad m = 1 \text{ à M} \qquad (26)$$

$$\sum_{m=1}^{M} \rho_j^m \sum_{(i,j)\in G_m} f_{ij}^m \leq C_j \qquad j \in \hat{G} \qquad (27)$$

des contraintes relatives à la capacité de transport, c'est-à-dire, le flux de marchandises :

$$0 \leq \phi_{ij}^m \leq \sigma_m f_{ij}^m \qquad m \in M_{ij}, \qquad (i,j) \in G \qquad (28)$$

$$\phi_{ij}^m = \sum_{(k,l)\in O-D_m} (\sum_{n=1}^{N_{hl}^m} \sum_{k=1}^{K} \alpha(k,l,m,n,i,j)\theta_{hl}^{kmn}) \qquad (29)$$

des contraintes relatives aux niveaux de demande

$$0 \leq \sum_{n=1}^{N_{ij}^m} \theta_{ij}^{kmn} \leq T_{ij}^{km}([\overline{\pi}_{\lambda\mu}^{\alpha\beta}]) \qquad (30)$$

Et des contraintes relatives à la positivité.

5. Conclusion

Dans cette communication a été proposée une première formulation de problème du dimensionnement de l'offre de transport dans un système multimodal de transport de charge. Celle-ci est caractérisée par :

- des niveaux d'offre et de demande désagrégés.
- la prise en compte de l'influence des coûts de transport sur les niveaux et la distribution de la demande.
- la distinction entre flux de marchandises et flux de véhicules.

La suite de cette étude portera sur :

- La mise au point un algorithme de résolution.
- La caractérisation de la modalité transport aérien dans la formulation du problème.
- L'extension de l'approche au cas du transport intermodal en intégrant les phénomènes de saturation.
- L'identification des éléments contraignants du réseau de transport et l'évaluation de la sensibilité de la solution.
- Le développement d'une application de l'approche proposée à un cas d'étude concret.

RÉFÉRENCES

[CL97] T. G. Crainic and G. Laporte. Planning models for freight transportation. *European Journal of Operational Research*, Septembre 1997.

[CMJ08] A. Caris, C. Macharis, and G.K. Janssens. Planning problems in intermodal freight transport : Accomplishments and prospects. In *Transport Planning and Technology*, June 2008.

[Cra05] Semet-F. Crainic, T. In *Recherche Operationnelle et Transport de Marchandises*, Montreal, Canada, 2005.

[DMP08] M. Drummond, C. Mancel, and Mora-Camino F. Pereira, A. An optimization approach for long planning of multimodel freight transportation systems. In *EngOpt*, Rio de Janeiro, Brasil, Juin 2008.

[DP08] M. Drummond and Mora-Camino F. Pereira, A. A global model for long term planning of multimodal freight transportation systems. In *PANAM*, Cartajena, Colombia, Septembre 2008.

[FF62] L.R. Ford and D.R. Fulkerson, 1962.

[Kan83] A. Kanafani. In *Transportation Demand Analysis*. McGraw-Hill Book Company, 1983.

[LEPY03] H.R. Lubis, S. Elim, L.B.B. Prasetyo, and Yohan. Multimodal freight transport network planning. In *Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies*, Octobre 2003.

[Per06] A. Pereira. In *Courso de Teoria Geral de Sistema*, Rio de Janeiro, Brasil, 2006.

[PR04] M. Park and A.C. Regan. In *Capacity Modeling in Transportation : A multimodal Perspective*, Californie, Etats-Unis, 2004.

[Vas03] A.V. Vasiliauskas. Modelling of a national multimodal transport network. In *Transport and Telecomunication*, Vilnius, Lithuania, 2003.

[Yan95] G. Yannis. In *Gestion des Flux et Strategie Concurrentielle dans le Transport*, Athenes, Grece, 1995.