

MODÉLISATION DU CHOIX MODAL DES CHARGEURS EN TRANSPORT DE MARCHANDISES (I)

Fei JIANG, Christian CALZADA

Cette recherche s'inscrit dans le cadre d'une réflexion commune associant plusieurs partenaires : le SES, l'ENPC et l'INRETS, et dont l'objectif principal est l'analyse de l'impact des facteurs logistiques sur le choix modal des chargeurs en transports de marchandises, en vue d'une meilleure évaluation socio-économique des projets d'infrastructures.

État des lieux

La situation européenne se caractérise par une part de plus en plus prédominante du transport routier. Par ailleurs le choix des solutions de transport (modes, infrastructures) sera de plus en plus influencé dans le futur par les différents types de marché et par les exigences de qualité en logistique, bien que ce choix modal soit restreint par une accessibilité et une diffusion limitées des infrastructures de transport.

La chaîne de transport devient en effet de plus en plus complexe et les réseaux de transport se transforment de simples relations point-à-point en réseaux logistiques plus denses. Les conséquences des mutations logistiques déterminent donc non seulement les relations entre partenaires mais également les politiques d'aménagement régional et de choix dans le développement des infrastructures de transport. Ainsi, pour mettre en œuvre une planification efficiente des infrastructures de transports qui permette un bon équilibre des modes de transport, il faut tout d'abord identifier les facteurs logistiques qui influencent le choix modal et comprendre comment ces facteurs influencent ces choix.

Une nouvelle approche du choix modal des chargeurs

Pour analyser et estimer les déterminants du choix modal des chargeurs, il est donc nécessaire de disposer d'une modélisation de la demande qui permette de l'expliquer à partir du niveau de service offert par les différents modes et par les caractéristiques de la demande (attributs de la marchandise, comme la catégorie dans la nomenclature statistique des transports ou le poids de l'envoi, et des chargeurs, par exemple la taille de l'établissement ou la présence ou non d'un embranchement ferroviaire).

La recherche dont les résultats sont présentés ici s'appuie donc sur un modèle de choix discret¹ qui permet de modéliser finement la décision de choix modal faite par le chargeur. Une telle approche est classique en transport de voyageurs (notamment en transport urbain) mais beaucoup moins répandue en transport de marchandises. En effet, pour prendre en compte avec la souplesse nécessaire les caractéristiques de l'offre et de la demande de transport, un tel modèle doit être estimé sur des données désagrégées, qui sont lourdes et difficiles à rassembler. Ce travail utilise la seule source de données désagrégées disponible à ce jour en France : l'*enquête auprès des chargeurs*, menée par l'INRETS en 1988.

¹ Un modèle de choix discret rend compte du comportement d'un individu qui est confronté à un nombre fini d'alternatives (ici des modalités de transport) et choisit celle qui maximisera son utilité.

Un tel modèle peut être à utilité « déterministe » ou « stochastique » selon que l'utilité a ou non une composante aléatoire ; les modèles à utilité stochastique permettent de tenir compte de la rationalité limitée du décideur et de l'information imparfaite de l'observateur. Dans cette recherche, nous nous sommes placés dans le second cas ; les résultats présentés ici sont obtenus avec un modèle de type « logit ».

MODÈLES

Ont été modélisés, dans un premier temps, le choix entre transport « privé » (compte propre) et « public » (compte d'autrui) et, dans un deuxième temps, à l'intérieur de la modalité « transport public », le choix entre « route », « fer » et « transport combiné ». ² Les principales variables explicatives du choix modal sont retracées dans la partie **Glossaire**.

L'impact des caractéristiques des chargeurs et des envois et le choix du type de prestation et du mode de transport

Les principaux résultats

L'interprétation des paramètres estimés du modèle s'est centrée sur deux points :

- l'analyse des effets marginaux d'une variable explicative sur l'utilité de chaque alternative ; c'est l'objet du tableau n°1 qui retrace la variation du rapport des probabilités de deux alternatives quand la variable étudiée varie d'une unité (ou passe d'une situation à une autre pour une variable indicatrice) ³ ; dans ce tableau, on lit par exemple que, pour un établissement régional, la probabilité de choisir le transport public est 0,6615 fois inférieure à celle d'un établissement autre que régional (national ou international) ;

Tableau n°1 : Effets marginaux des variables explicatives sur les utilités*

Variables explicatives	Public vs Privé	Route vs Fer	Combiné vs Fer	Route vs Combiné	Unique vs Multiple
distance	1,0053	0,9983	1,0031	0,9954	0,9989
effectif salarié	0,9995		0,9994		
<u>nature de l'établissement :</u>					
régional	0,6615				
mondial	1,9654				
chargeur = entrepôt	0,2725	0,2837			
chargeur = magasin	0,4352		0,4102	0,5167	
destinataire = entrepôt	0,6497				
<u>conditionnement :</u>					
conteneurs					10,5008
vrac					4,0385
fûts-citernes		9,4877	7,0993		
conteneur-citernes		4,306			
colis	2,1405				
palettes		2,2233	3,1268	0,6395	1,6158
envoi partie d'un lot				0,6214	
envoi dans une tournée	0,0863	7,5383			2,0941
envoi à l'étranger			0,0101	104,585	2,0004
envoi à Paris		0,6408	2,1946	0,3073	1,5936
envoi départ de Paris		0,4308	0,4066		0,6268
<u>parc du chargeur :</u>					
camion propre (< 3tcu)	0,3887	0,4177		0,4449	
camion propre (3tcu-6tcu)		0,3198	0,4131		0,5987
camion propre (6tcu-17tcu)	0,1612				
camion propre (> 17tcu)	0,1376				
wagons en propre		0,9722		0,9675	
<u>accessibilité à l'infrastructure :</u>					
accès à l'autoroute du chargeur			0,3697	2,4547	1,4061
accès au fer du chargeur	1,7045	0,5945			1,8176
accès au fer destinataire	1,8318	0,3012	0,3764		1,6253
système d'information	6,1719	5,207			
poids d'envoi		1,000	0,9999	1,0001	1,00E+00
fréquence d'envoi	1,000	1,000			1,00E+00
<u>nature des produits :</u>					
machines					0,5124
articles manufacturés	1,4018				
alimentaires	0,7443				0,6038
métallurgie	1,9004				
agricoles	0,5681				

* $\exp(\beta) = P(Y=1)/(1-P(Y=1))$

² Cette modélisation (en « logit emboîté ») tient compte de la dépendance entre les alternatives relatives au choix de sous-traiter ou non le transport et au mode de transport.

³ S'il n'y a que deux solutions alternatives (par exemple compte propre / compte d'autrui) et si la fonction d'utilité est linéaire, cette variation s'interprète comme l'exponentielle du coefficient de la fonction d'utilité relatif à la variable explicative considérée.

MODÈLES

- l'analyse des effets marginaux d'une variable explicative sur la probabilité de choix d'une alternative, qui fait l'objet du tableau n°2.

Tableau n°2 : Effets marginaux des variables explicatives sur les probabilités de choix

Variables explicatives	Effets sur la probabilité*				Elasticités**			
	Privé	Route	Combiné	Fer	Privé	Route	Combiné	Fer
<i>distance</i>	-0,0012	0,001	3,74E-05	7,54E-05	-0,995	0,449	1,782	0,924
<i>effectif salarié</i>		0,000	0,000	0,000		-0,006	0,131	0,131
<i>nature de l'établissement :</i>								
<i>régional</i>	0,090	-0,087	-0,001	-0,003	0,039	-0,019	-0,019	-0,019
<i>mondial</i>	-0,148	0,142	0,001	0,005	-0,090	0,043	0,043	0,043
<i>chargeur = entrepôt</i>		-0,029	0,000	0,029		-0,004	0,000	0,110
<i>chargeur = magasin</i>		-0,023	0,005	0,018		-0,004	0,087	0,087
<i>destinataire = entrepôt</i>	0,094	-0,090	-0,001	-0,003	0,033	-0,016	-0,016	-0,016
<i>conditionnement :</i>								
<i>fûts-citernes</i>		0,051	-0,001	-0,050		0,003	-0,008	-0,079
<i>conteneur-citernes</i>		0,040	-0,008	-0,032		0,003	-0,078	-0,078
<i>colis</i>	-0,17	0,16	0,0014	0,0056	-0,243	0,116	0,116	0,116
<i>palettes</i>		0,016	0,002	-0,018		0,005	0,076	-0,161
<i>envoi dans une tournée</i>	0,536	-0,502	-0,007	-0,027	0,221	-0,103	-0,159	-0,159
<i>envoi à l'étranger</i>		0,026	-0,027	0,001		0,002	-0,278	0,002
<i>envoi à Paris</i>		-0,017	0,007	0,010		-0,004	0,209	0,073
<i>envoi départ de Paris</i>		-0,018	-0,001	0,019		-0,004	-0,012	0,117
<i>parc du chargeur :</i>								
<i>camion propre (< 3 tcu)</i>		-0,021	0,000	0,021		-0,006	0,007	0,168
<i>camion propre (3 tcu-6 tcu)</i>		-0,026	0,001	0,025		-0,004	0,022	0,110
<i>camion propre (6 tcu-17 tcu)</i>	0,399	-0,383	-0,004	-0,013	0,169	-0,081	-0,081	-0,081
<i>camion propre (> 17 tcu)</i>	0,434	-0,416	-0,004	-0,015	0,304	-0,145	-0,145	-0,145
<i>wagons en propre</i>		-0,001	0,000	0,001		-0,001	0,022	0,022
<i>accessibilité à l'infrastructure :</i>								
<i>accès à l'autoroute du chargeur</i>		0,006	-0,006	0,000		0,003	-0,286	0,003
<i>accès au fer du chargeur</i>	-0,117	0,095	0,004	0,017	-0,098	0,040	0,205	0,205
<i>accès au fer du destinataire</i>	-0,133	0,094	0,002	0,036	-0,056	0,020	0,056	0,216
<i>système d'information</i>		0,041	-0,001	-0,040		0,005	-0,008	-0,130
<i>poids d'envoi</i>		0,000	0,000	0,000		0,004	-0,530	0,023
<i>fréquence d'envoi</i>	0,000	0,000	0,000	0,000	-0,068	0,030	0,079	0,079
<i>nature des produits :</i>								
<i>articles manufacturés</i>	-0,074	0,071	0,001	0,003	-0,060	0,029	0,029	0,029
<i>alimentaires</i>	0,065	-0,062	-0,001	-0,002	0,028	-0,013	-0,013	-0,013
<i>métallurgie</i>	-0,141	0,135	0,001	0,005	-0,012	0,006	0,006	0,006
<i>agricoles</i>	0,124	-0,119	-0,001	-0,004	0,013	-0,006	-0,006	-0,006
Probabilité	0,324	0,648	0,006	0,023				

* Effets marginaux sur la probabilité :

$$\frac{\partial \text{Pr ob}(y = j)}{\partial x_k} = P_j \left(\beta_{jk} - \sum_{j=1}^{J-1} P_j \beta_{jk} \right)$$

** Elasticités :

$$E_{x_k}^{P(i)} = \frac{\partial P(i)}{\partial x_k} * \frac{x_k}{P(i)} = [1 - P(i)] x_k \beta_{jk}$$

Dans ce tableau, tous les résultats présentés sont calculés pour la valeur moyenne des variables explicatives dans l'échantillon (pour une variable indicatrice, cette moyenne est prise égale au pourcentage d'individus qui possèdent la caractéristique considérée).

La première colonne indique l'effet d'un changement d'une unité de la variable explicative considérée sur les probabilités de choix des différentes alternatives. Par exemple, si la distance augmente d'un kilomètre, la probabilité de choisir le transport privé diminue de 0,0012 et celles de choisir le transport routier public, combiné et ferroviaire augmentent respectivement de un millièmes, 37,4 millièmes et 75,4 millièmes. Si le nombre d'envois conditionnés en colis augmente de 1 %, la probabilité de choisir le transport privé va baisser de 0,17 % et les probabilités de choisir la route (compte d'autrui), le transport combiné et le fer vont augmenter respectivement de 0,16 %, 0,0014 % et 0,0056 %.

La deuxième colonne présente les élasticités des probabilités des alternatives par rapport aux variables explicatives. Par exemple, si la distance augmente de

MODÈLES

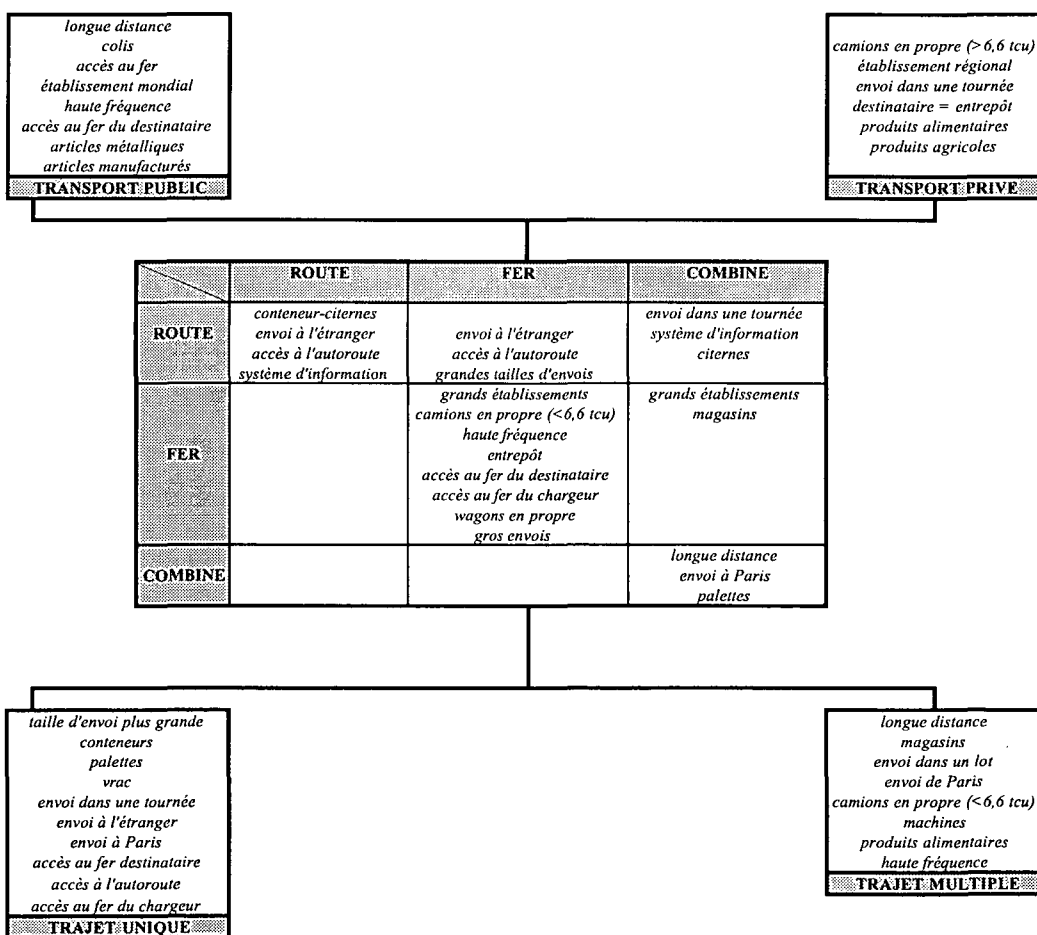
1 %, la probabilité de choisir le transport privé diminue de 0,995 % et les probabilités de choisir la route en compte propre, le transport combiné et le fer augmentent respectivement de 0,449 %, 1,782 % et 0,924 %. Si le nombre des destinataires pouvant accéder directement à l'infrastructure ferroviaire augmente de 1 %, la probabilité de choisir le transport privé diminue 0,056 % et les probabilités de choisir les modes routier, ferroviaire et combiné augmentent respectivement de 0,02 %, 0,056 % et 0,216 %.

Ces résultats, qui ne sont évidemment valables qu'au voisinage des valeurs moyennes de chacune des variables explicatives, permettent de donner un ordre de grandeur de l'impact intrinsèque de chacune de ces variables. Ils font ressortir le rôle important de la distance de transport, mais aussi du conditionnement, du poids de l'envoi, de l'existence d'un parc propre ou de l'accès au fer. En revanche, l'accès à l'autoroute semble jouer un rôle plus mineur, non seulement dans le choix entre transport privé et transport public, mais également entre fer et route ⁴.

Effets des facteurs logistiques sur le choix modal

L'analyse des signes des paramètres estimés du modèle permet de mettre en évidence le rôle des facteurs logistiques (conditionnement, parc en propre, destination des envois, accessibilité aux infrastructures, type d'établissement, etc.), sur le choix modal. Un signe positif (respectivement négatif) d'un paramètre estimé signifie que la probabilité de choix augmente (respectivement diminue) avec la présence de X. Ces résultats sont présentés dans le tableau n°3.

Tableau n°3 : Effets des variables discrètes sur le choix modal



⁴ Il est par contre très défavorable au combiné.

MODÈLES

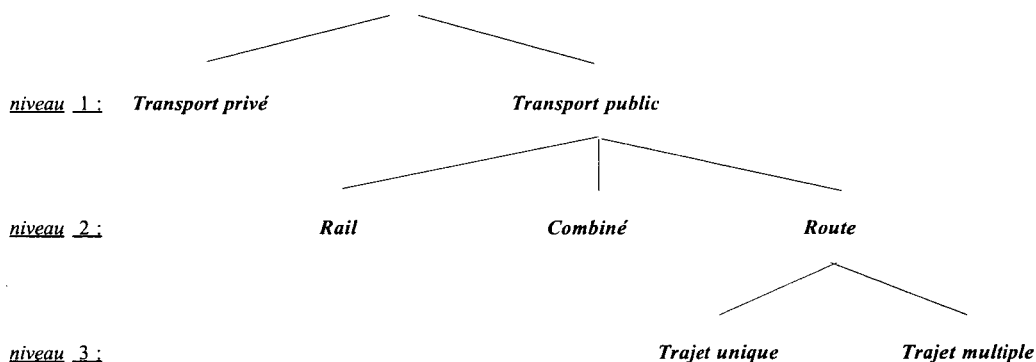
Le tableau n°3 dresse une cartographie des principaux facteurs qui ont une influence positive sur le choix d'un type ou d'un mode de transport. On lit par exemple qu'en ce qui concerne le choix entre le fer, la route et le transport combiné, les entrepôts ou les chargeurs qui possèdent un parc en propre de camions de petite taille ou peuvent accéder directement à l'infrastructure ferroviaire, préféreront le mode ferroviaire. La plupart des envois conditionnés en palettes ou à longue distance ou destinés à la région parisienne choisissent le transport combiné. Quant aux envois conditionnés en citernes-conteneurs, ils sont effectués en priorité par la route.

Effets des variables continues sur le choix modal

L'impact de l'évolution des probabilités de choix modal sur les variables continues est reproduit dans les graphiques pour les variables de distance de transport, de poids de la marchandise et de fréquence des envois.

Le comportement des chargeurs varie sensiblement en fonction des zones de transport. Les chargeurs privilégient le transport privé en zone urbaine, et le transport public en zone longue et à l'étranger. Si la distance est inférieure à 300 km, les trafics se partagent entre transport privé et transport routier public. Si la distance est inférieure à 150 km, la probabilité de choisir le transport privé est plus forte que celle de choisir le transport routier public. La probabilité maximale de choix du transport routier public (respectivement fer) est d'environ 700 km (respectivement 1 300 km). Au delà de 1 400 km, c'est le transport combiné qui devient dominant, alors que le fer voit sa part diminuer. L'impact de la distance sur le choix du mode ferroviaire est cependant sensiblement différent suivant que l'établissement est embranché au réseau ferroviaire ou non. Quant à la fréquence des envois, elle a un impact très positif sur la probabilité de choisir le fer (d'autant plus fort que l'établissement est embranché) mais plus modéré sur le transport combiné.

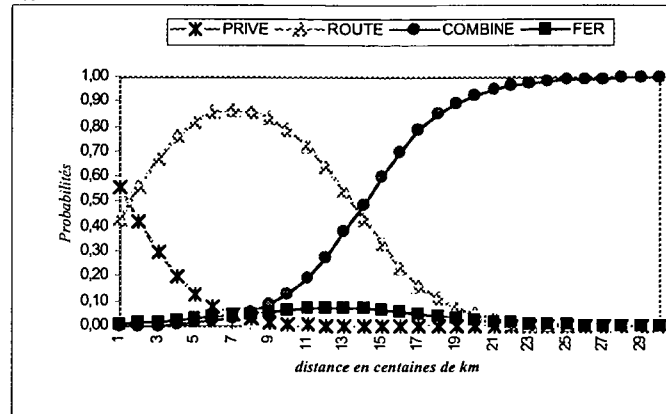
Graphique n°1 : Diagramme du processus de choix modal



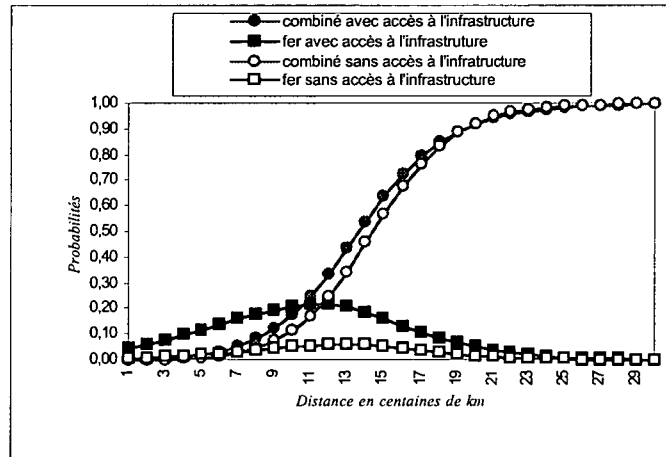
MODÈLES

Graphique n°2 : Effets des variables continues sur le choix modal

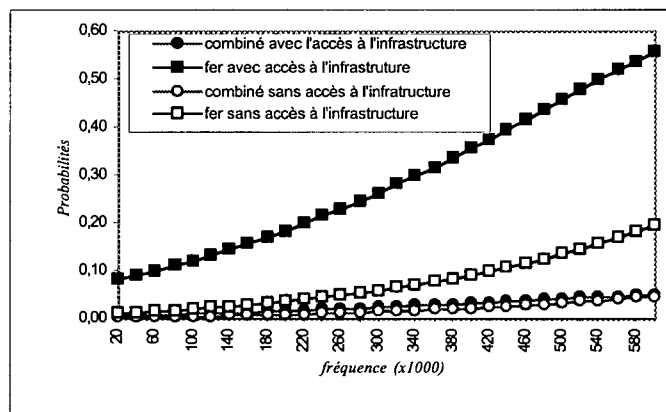
Effets de la distance sur le choix modal



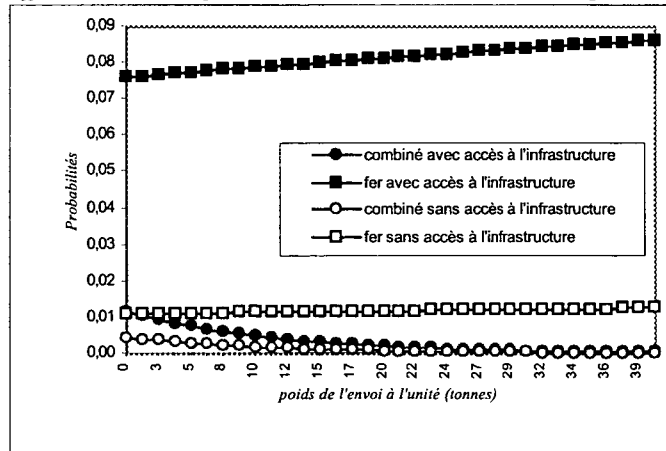
Effets de la distance sur le choix modal des chargeurs accédant au fer



Effets de la fréquence d'envoi sur des chargeurs accédant au fer



Effets de la taille de petits envois sur le choix modal des chargeurs accédant au fer



GLOSSAIRE

Envoi

Un *envoi* se définit comme la mise effective, au même moment, à la disposition d'un transporteur ou d'un commissionnaire de transport, d'une quantité de marchandises dont le transport est demandé par un même expéditeur pour un même destinataire, d'un lieu de chargement unique à un lieu de déchargement unique et faisant l'objet d'une seule déclaration d'expédition et d'un même contrat de transport.

Segmentation du marché

Les *activités* sont rassemblées en vingt groupes selon trois catégories permettant de se situer dans les circuits de production-distribution : biens intermédiaires (8), biens de production (4), biens de consommation (8).

Nature des chargeurs et destinataires

On distingue la nature des établissements suivant qu'il s'agit d'une usine, d'un magasin de vente ou d'un entrepôt.

Structure de l'entreprise à laquelle appartient l'établissement chargeur

Etablissement unique, établissement appartenant à une entreprise implantée dans une région française seulement, établissement appartenant à une entreprise implantée en France, en Europe et sur plusieurs continents.

Accessibilité à l'infrastructure

L'accessibilité à l'infrastructure représente la contrainte de choix modal. On considérera trois cas :

- l'accès direct à un embranchement ferroviaire pour le chargeur ;
- le raccordement direct à une voie rapide ou autoroute pour le chargeur ;
- le raccordement direct à un embranchement ferroviaire pour le destinataire.

Est aussi pris en compte le raccordement à un équipement informatique permettant de communiquer avec les partenaires pour des opérations de transport.

Caractéristiques de l'envoi

Distance

Distance en kilomètres, de département à département, calculée à partir du fichier SITRA-M 1988 comme le rapport des tonnes-kilomètres aux tonnes.

Fréquence des expéditions

Les résultats de l'enquête donnaient un nombre d'envois par an pour les destinataires de chacun des envois, regroupés en quatre classes : annuelle, mensuelle, hebdomadaire et quotidienne.

Taille des établissements

L'activité de transport est étroitement liée à la taille de l'établissement (nombre de salariés). On ne retient que les établissements de plus de 10 salariés (les établissements de plus de 1000 salariés sont enquêtés de façon exhaustive).

Poids des envois (kg)

Dans cette enquête, on s'est intéressé à tous les envois supérieurs à 1 kg, à la seule exclusion des colis postaux. 45 % des envois sont des petits lots de moins de 300 kg, quant au poids moyen de l'envoi il est d'environ 4000 kg toutes catégories d'activités confondues.

Valeur de l'envoi (francs 1988)

L'unité de valeur peut être modifiée à la demande, puisque le résultat brut de l'enquête est donné en valeur de l'envoi. Par exemple, la valeur au kilogramme est calculée en divisant cette valeur par le poids de l'envoi. Dans cette base, 40 % des envois concernent des marchandises de moins de 10 000 francs et la valeur moyenne de l'envoi est de 45 000 francs.

Conditionnement de l'envoi

Le conditionnement des marchandises au départ de l'établissement est renseigné dans l'enquête. Pour l'ensemble des envois, deux types de conditionnement se retrouvent en majorité : les colis et les palettes. D'autres types de conditionnement sont présents, à savoir : citerne, conteneur-citerne, conteneur ou caisse mobile, vrac sec, autre conditionnement spécifique (fûts, ...). Le transporteur peut ensuite reconditionner l'envoi en procédant notamment aux opérations d'*empotage* (mise en conteneur). On sait, par conséquent, si l'envoi est ou non conteneurisé, que ce soit au départ du chargeur ou à un moment quelconque de la chaîne. Est mentionné le fait que l'envoi est isolé ou qu'il fait partie d'un lot ou d'une tournée.

Lieu de livraison et de départ

Afin de traduire les effets des facteurs géographiques sur le choix modal, on distingue les envois destinés à l'étranger de ceux destinés à Paris ou au départ de Paris.

SITRA-M : Système d'information sur le transport de marchandises.

RÉFÉRENCES

- Ben-Akiva, M. and Steven R. Leman (1985). *Discrete Choice Demand : Theory and Application to Travel Demand*, The MIT Press, Cambridge, Massachusetts.
- Bredeloup, E., Costa G. et al. (1989). *Enquête auprès des Chargeurs, Résultats de la Deuxième Phase*, Rapport INRETS n°92.
- Crainic, T.G. (1985) *Intercity multimode freight transportation : the state of the art*, Centre de recherche sur les transports, Université de Montréal.
- Fowkes, A.S. and al. (1991). Investigating the market for inter-modal freight technologies. *Transportation Research A*, Vol. 25A-4, pp. 161-172.
- Gouvenal, E. et Hanappe P. (1986). *Enquête auprès des Chargeurs, Bilan de la pré-enquête*, Rapport INRETS n°13.
- Gouvenal, E. et Hanappe P. (1986). *Quels besoins pour les chargeurs ? , Variété de la demande et choix de transport*, Rapport INRETS n°178.
- Gouvenal, E. et Hanappe P. (1995). *La formation des prix dans le transport de marchandises, Valeur et poids de l'envoi. Distance et durée du transport*. Rapport INRETS n°195.
- Jong, G.C. de, M.A. Gommers and J.P.G.N. Klooster (1992). Time valuation in freight transport : method and results. *PTRC*, Manchester, 1992.
- Widlert, S. and M. Bradley (1992). Preference of freight services in Sweden, *6th World conference in Transport Research*, Lyon, 1992.
- Wynter, L. (1994) La valeur du temps de transport de fret en France, Estimation à partir d'une enquête sur les préférences déclarées, *Recherche Transports Sécurité*, n°44.