

## Quelques innovations en économie des transports

Marc GAUDRY

Département de sciences économiques  
et Centre de recherche sur les transports  
Université de Montréal

### 1. MODELISATION DE LA DEMANDE DE TRANSPORT

Dans cet article<sup>1</sup>, nous souhaitons donner une idée d'activités de recherche en économie des transports, plus particulièrement dans le domaine de l'analyse de la demande de transport. Nous choisirons à cette fin trois modèles ou familles de modèles dont nous donnerons les grandes lignes et dont nous soulignerons les aspects innovateurs et résumerons l'état de diffusion.

Pour chaque modèle, les innovations qui nous intéresseront auront trait à la formulation économique, à la formulation économétrique, aux données et aux résultats. En tous points, nous nous limiterons à des esquisses et négligerons à souhait les raffinements, et parfois la mécanique, du contenu scientifique, pour ne retenir que le sens commun et général.

---

<sup>1</sup> Qui reprend pour l'essentiel le texte d'un discours de réception à la Société Royale du Canada le 10 février 1989 à l'Université de Montréal intitulé "Innovations économétriques appliquées aux transports" (Gaudry, 1990).

## 2. LE MODELE DEMTEC

### A. Idée du modèle

La question posée dans DEMTEC (DEMande de Transport En Commun) est celle de l'explication de D, le niveau de la clientèle du transport en commun dans une région urbaine. La structure établie pour répondre à cette question est la suivante:

Demande:  $D \leftarrow (P, T, M, A, Y, \text{ETC.})$  (1)

Service réalisé:  $T \leftarrow (D, O, \text{ETC.})$  (2)

Service offert:  $O \leftarrow (R(D), C, \text{ETC.})$  (3)

où la quantité de déplacements D, le service T et l'offre O sont expliqués par des catégories de variables telles les prix P, la motorisation M, le niveau des activités économiques A, les caractéristiques socio-économiques des consommateurs Y, les revenus de l'entreprise R, ses coûts C et d'autres variables ETC.

### B. Dimensions innovatrices

Le modèle, développé de 1970 à 1973 (Gaudry 1973, 1975, 1978), présentait plusieurs innovations. Du point de vue de sa formulation, il comprenait trois "étages" (Offre, Service réalisé, Demande) au lieu des deux niveaux habituels (Offre, Demande). Cette représentation formelle d'un équilibre élargi à la détermination du niveau de service réalisé (par exemple, la congestion) présentait l'équilibre (Gaudry 1979, 1980) comme un état obtenu par l'ajustement des prix et des temps d'attente (et des vitesses)—pas seulement des prix: elle excluait d'emblée tout formulation dite de déséquilibre et suggérait d'utiliser plutôt un système à trois niveaux sous l'étiquette "Demande-Coût-Offre". Elle fut ensuite réétiquetée "Demande-Performance-Offre" et étendue pour comprendre d'autres niveaux—comme celui de la minimisation des coûts—dans le domaine des transports (Florian et Gaudry 1980, 1983). Elle a été récemment appliquée à la modélisation des marchés réglementés, notamment ceux des économies à planification centralisée où les files d'attente s'ajoutent aux prix pour rétablir l'équilibre (Gaudry et Kowalski 1990).

Du point de vue de la méthode économétrique d'estimation des paramètres, la procédure utilisée consistait à combiner la régression linéaire et les méthodes de Box et Jenkins pour analyser les résidus, combinaison qui s'avérait puissante pour corriger implicitement certaines lacunes de la liste des facteurs explicatifs et qui fut diffusée par les logiciels documentés GAUSEQ et GAUMEQ (Gaudry et Liem 1991).

Par ailleurs, l'utilisation de données mensuelles était nouvelle dans ce contexte et permettait une formulation riche en variables explicatives. Dans un modèle à une équation destiné à expliquer la

demande ferroviaire entre Boston et New York, par exemple, Fisher (1962) n'utilisait que quatre variables.

Les résultats pour les équations de demande (1) montraient que la clientèle des adultes était plus sensible au niveau de service qu'au prix et permettait d'isoler l'influence d'un nombre important de facteurs explicatifs, dont celui du revenu: à cet égard, il faut noter que les hausses de revenu, toutes choses étant égales par ailleurs, impliquent une hausse de consommation, ce qui suggère que le transport public n'est pas un bien inférieur. Les résultats pour les fonctions d'offre (3) donnaient une idée de l'impact des hausses de tarif sur le niveau de service (positif) et de celui (négatif) des hausses de coût, en particulier celles des salaires des chauffeurs. On pouvait par ailleurs constater que la réorganisation financière qui avait eu lieu à la fin des années soixante n'avait pas eu d'impact sur le niveau de service, contrairement à ce que plusieurs avaient prétendu à l'époque, parce qu'ils s'inquiétaient du changement de propriété qui avait alors eu lieu.

### C. Utilisation et diffusion

La Société de Transport de la Communauté Urbaine de Montréal (S.T.C.U.M.) implanta DEMTEC à partir de 1974 et l'utilisa fréquemment jusqu'en 1986 pour expliquer et prédire sa clientèle mensuelle. Cette implantation conduisit à des raffinements importants qui firent que la procédure, qui utilise une quarantaine de variables, s'approchait à 1% du réel et permettait de détecter des irrégularités comme des vols de billets et d'argent par des groupes d'employés lorsque la répartition de ces actes dans le temps enlevait à l'erreur d'explication du modèle son caractère aléatoire (des arrestations de ces employés par la police rétablit le caractère de "bruit blanc" de l'erreur). Depuis l'utilisation des laissez-passer (cartes autobus-métro), l'entreprise a perdu la mesure exacte de sa clientèle: une deuxième version du modèle est en cours d'élaboration pour estimer à l'aide du modèle lui-même le niveau de la clientèle qui utilise les laissez-passer, tout en l'expliquant en même temps. La *Toronto Transit Commission* implanta en 1981 une version particulière du modèle afin d'expliquer chacun de ses quatre marchés (ou groupes tarifaires). Elle l'utilise notamment pour faire des prévisions de long terme.

## 3. LE MODELE DRAG

### A. Idée du modèle

Le modèle DRAG (la Demande Routière, les Accidents et leur Gravité) vise à expliquer le niveau de la sécurité routière et à identifier l'existence d'une substituabilité entre les diverses composantes du risque de conduite.

En termes simples, on peut dire que le niveau de dommages ou pertes  $L$  associé à une activité est le résultat du niveau d'exposition au risque

E, de la fréquence des accidents F et de leur gravité G: on peut écrire la

$$\text{Fonction de dommages: } L = E \cdot F \cdot G \quad (4)$$

dont l'étude souvent partielle consiste à expliquer une seule composante, par exemple les accidents mortels.

La structure du modèle DRAG (Gaudry 1984) consiste au contraire à expliquer le nombre de victimes de la route VI (par catégorie) en fonction de la demande routière DR (par catégorie), de la fréquence des accidents A (par catégorie) et de leur gravité G (par catégorie):

$$\text{Victimes: } VI = DR \cdot A \cdot G \quad \text{Performance dommages (5)}$$

$$\text{Demande routière: } DR \leftarrow (Y, X^{dr}) \quad \text{Risque d'exposition (6)}$$

$$\text{Accidents: } A \leftarrow (DR, Y, X^a) \quad \text{Risque de fréquence (7)}$$

$$\text{Gravité: } G \leftarrow (DR, Y, X^g) \quad \text{Risque de gravité (8)}$$

(victimes par accident)

$$\text{Facteurs subsidiaires: } Y \leftarrow (X^y) \quad (9)$$

où Y désigne des facteurs explicatifs d'intérêt particulier pour lesquels des équations sont formulées (comme le stock d'automobiles, le nombre de permis de conduire et la consommation d'alcool ou de tabac) et les X désignent tous les autres facteurs explicatifs appartenant à diverses classes, dont les prix, les véhicules (nombre et caractéristiques), les réseaux (les lois et leur application par la police, les niveaux de service des modes, les caractéristiques physiques de l'infrastructure), les caractéristiques des conducteurs (générales, d'âge, de sexe et de vigilance), les activités économiques et les motifs des déplacements, et le reste.

## B. Dimensions innovatrices

Du point de vue de la formulation, cette structure permet de détecter la substitution entre les risques associés à l'exposition et ceux qui sont associés à la manière de conduire. On peut par exemple voir que la neige réduit l'exposition (le kilométrage), augmente le nombre d'accidents mais réduit leur gravité en sorte qu'elle est sans effet sur le nombre de morts mais augmente seulement le nombre de blessés.

Du point de vue des méthodes économétriques, le modèle utilise pour la première fois à grande échelle, c'est à dire sur un nombre important d'équations à la fois (sept dans le modèle proprement dit), l'algorithme L-1 qui incorpore la possibilité de laisser les données décider de la forme mathématique des fonctions (6)-(9) tout en corrigeant simultanément les erreurs de régression ou résidus de l'autocorrélation et de l'hétéroscédasticité qui pourraient s'y trouver, suivant une stratégie bien définie (Gaudry et Dagenais 1979a). Grâce aux transformations de Box et Cox, on évite ainsi d'avoir à

décider *a priori* si la forme linéaire ou la forme multiplicative (ou d'autres formes) doit être utilisée, ce qui est connu depuis longtemps, mais on le fait en obtenant simultanément une distribution sphérique des résidus, ce qui est nouveau et essentiel afin de ne pas confondre forme mathématique de la régression et distribution de l'erreur: la méthode avait d'abord fait ses preuves sur une analyse approfondie des équations du modèle DEMTEC (Dagenais *et al.* 1987) et, peu après, sur une équation semblable à (6) formulée pour l'ensemble de la République Fédérale d'Allemagne (Foos et Gaudry 1986). Bien documenté, le logiciel L-1 (Liem *et al.* 1983) a maintenant une trentaine d'utilisateurs dans quatorze pays.

Du point de vue des données, DRAG utilise une banque de séries mensuelles qui comprend plusieurs centaines de variables et qui est documentée (Gaudry *et al.* 1984). En plus de permettre l'incorporation d'un nombre important de facteurs explicatifs--plus d'une quarantaine dans les équations de DRAG--, le niveau d'agrégation mensuel fait un arbitrage acceptable entre la disponibilité de l'information et la richesse de l'explication. Ce niveau admet aussi l'utilisation de la loi normale pour expliquer le comportement des variables dépendantes du modèle et l'utilisation de la variance comme mesure de risque.

Chaque passage du modèle produit à peu près trois cent-cinquante résultats. On mesure notamment l'impact de plus d'une dizaine de lois, dont la Loi de l'assurance automobile en vigueur au Québec depuis le premier mars 1978 (Gaudry 1991), et d'autres résultats dont plusieurs ont des implications importantes pour l'établissement de la responsabilité ou de la faute au sens légal (Gaudry 1989a) et pourraient influencer la formulation de politiques.

Un des résultats les plus nouveaux est la constatation d'une corrélation négative entre les hausses de la consommation d'alcool et le nombre de morts sur la route. Des résultats compatibles à ceux de DRAG à cet égard ont par la suite été obtenus en Nouvelle-Zélande (Scott *et al.* 1987) et en Norvège (Fridström *et al.* 1989) à partir de modèles agrégés. Ils nous conduisent à une réévaluation du rôle de l'alcool dans les accidents et à un nouveau regard sur plusieurs études antérieures dont la nature désagrégée se prêtait mal à faire ressortir ce genre de constatation puisqu'il semble s'agir essentiellement d'un problème d'agrégation d'un grand nombre de conducteurs, dont le risque diminue si leur consommation d'alcool est faible, à un petit nombre de conducteurs dont le risque augmente énormément si leur consommation est trop élevée--la courbe de risque individuel associée à l'alcool ayant dans cette perspective une forme en U (quadratique)--ou, plus précisément, en J.

DRAG comprend par ailleurs des résultats nouveaux sur la relation entre grossesse et accidents de la route, résultats qu'il y a lieu d'explorer davantage à l'aide d'autres méthodes. Pour le moment nous avons formulé une hypothèse explicative de nature physiologique qui s'appuie sur des travaux de Zuckerman (1952) et a l'avantage d'expliquer des résultats anglais (Skegg *et al.* 1979) suggérant que la consommation d'an vulants haussait de manière très importante les risques d'accidents.

### C. Utilisation et diffusion

La Société d'assurance automobile du Québec (S.A.A.Q.) a décidé d'implanter DRAG comme modèle explicatif et prévisionnel des composantes du bilan routier québécois. Il faut alors prévoir d'ici deux ans un DRAG-2 plus riche et précis que DRAG-1.

DRAG a par ailleurs inspiré la formation d'un groupe d'analyse formé de représentants des quatre pays scandinaves afin de développer quatre modèles nationaux dont les paramètres seraient estimés à partir de données sur les comtés (19 en Norvège, 21 en Suède, etc.). Une confirmation générale des résultats de DRAG dans les quatre pays pourrait en particulier influencer la rédaction de projets de loi sur le niveau légal d'alcoolémie au volant, projets dont plusieurs sont à l'étude en Scandinavie. Enfin, une version allemande de DRAG, nommée SNUS (*StrassenverkehrsNachfrage, Unfälle und ihre Schwere*), est en cours d'élaboration dans le cadre d'une collaboration entre l'Université de Bamberg et l'Université de Montréal.

## 4. UNE FAMILLE DE MODELES PROBABILISTES

### A. Idée des modèles

Il existe une classe de modèles visant à expliquer  $p_m$ , la probabilité qu'un individu choisisse un mode de transport  $m$ , ou la part de marché de ce mode. Ils ont la forme générale suivante:

$$p_m = U_m / U \quad , \quad m = 1, \dots, M; \quad (10)$$

où

$$U_m = u_m ([X_N] , [X_s]), \quad m = 1, \dots, M; \quad (11)$$

$$U = (U_1 + \dots + U_M) \quad (12)$$

et les ensembles  $[X_N]$  et  $[X_s]$  dénotent respectivement des variables socioéconomiques ( $s = 1, \dots, S$ ) et de réseaux ( $n = 1, \dots, N$ ) pertinentes.

Le plus populaire de ces modèles est le LOGIT aux fonctions  $u_m$  linéaires (LIN-LOGIT aux figures 1 à 4). L'idée des familles considérées ici est de généraliser ce modèle de façon à contourner ses propriétés très restrictives tout en pouvant toujours le retrouver de manière simple comme cas particulier emboîté. Nous avons développé dans ce sens les familles BOX-COX LOGIT (Gaudry et Wills 1978), DOGIT (Gaudry et Dagenais, 1979b) et INVERSE POWER TRANSFORMATION (Gaudry 1981): leurs branches normales et généralisées permettent d'introduire la présence de captivité à un ou plusieurs modes (apparentée à la fidélité à des marques de commerce) ainsi que celle d'asymétrie dans la courbe de réaction (qui peut comprendre des effets de seuil) suite à des modifications des  $X$  ou des  $U_m$ . Aux figures 2,3 et 4, la captivité apparaît comme une queue épaisse des courbes de réaction en pointillés; aux figures 1, 3 et 4, l'asymétrie fait qu'on ne s'approche pas de la même façon du point d'inflexion de ces courbes suivant qu'on arrive par

Figure 1  
LIN-LOGIT vs BC-LOGIT

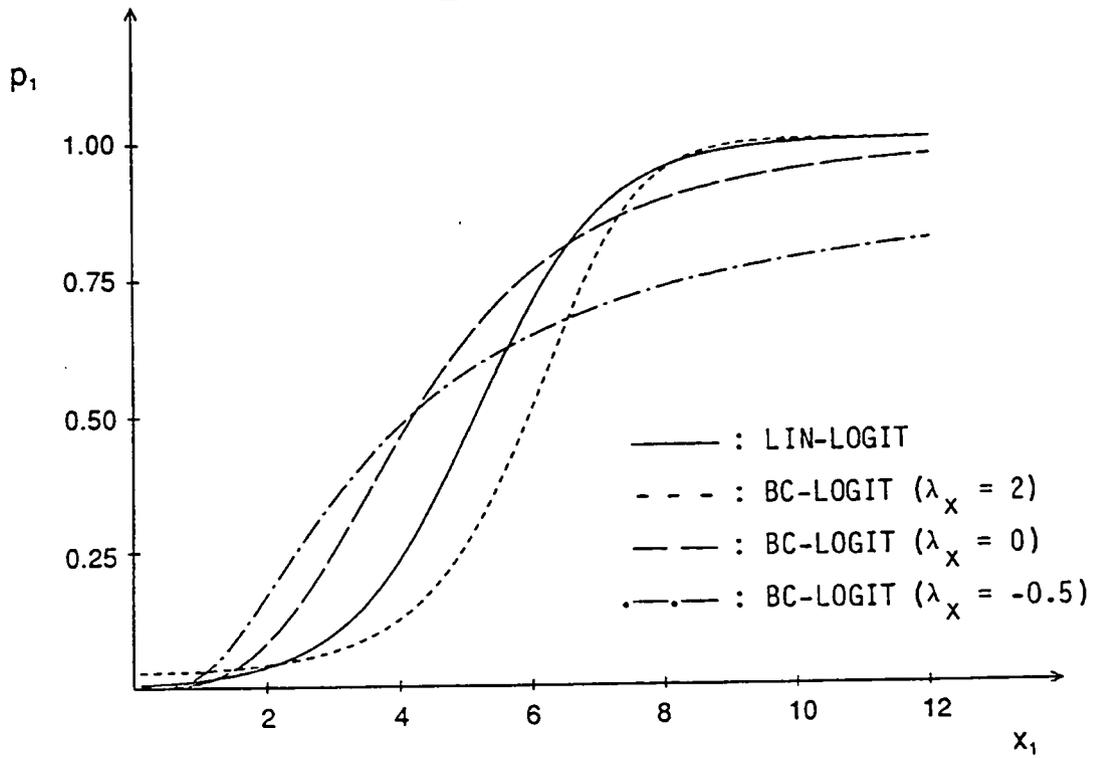


Figure 2  
LIN-LOGIT vs DOGIT-STANDARD

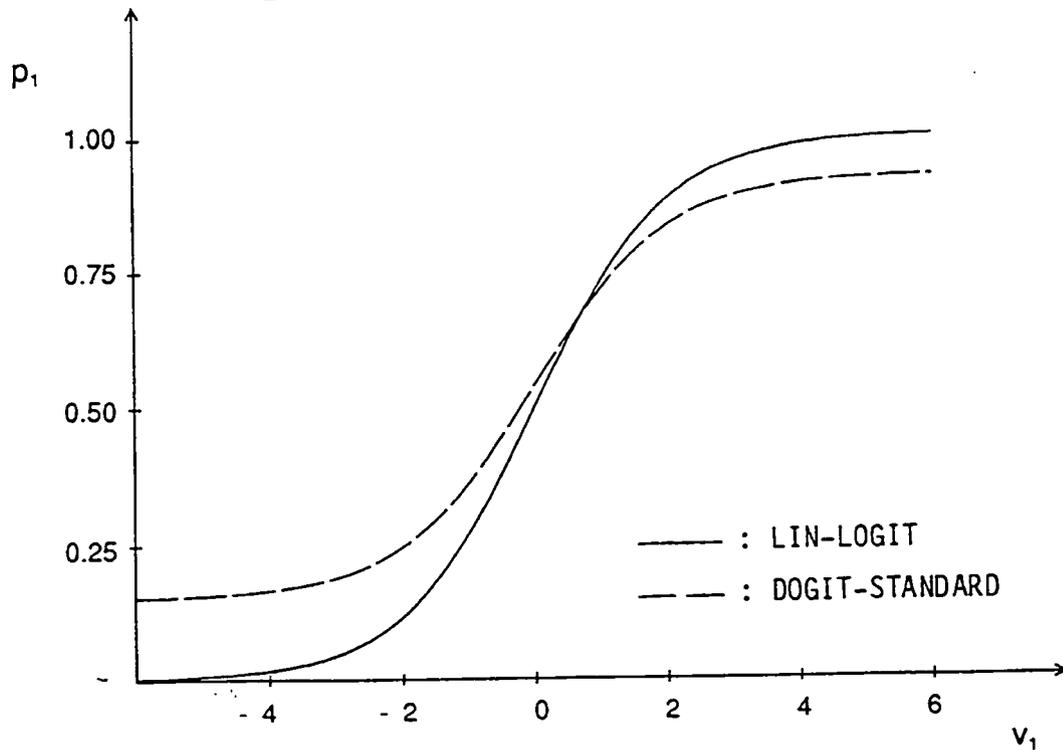


Figure 3

LIN-LOGIT vs LIN-IPT-LOGIT

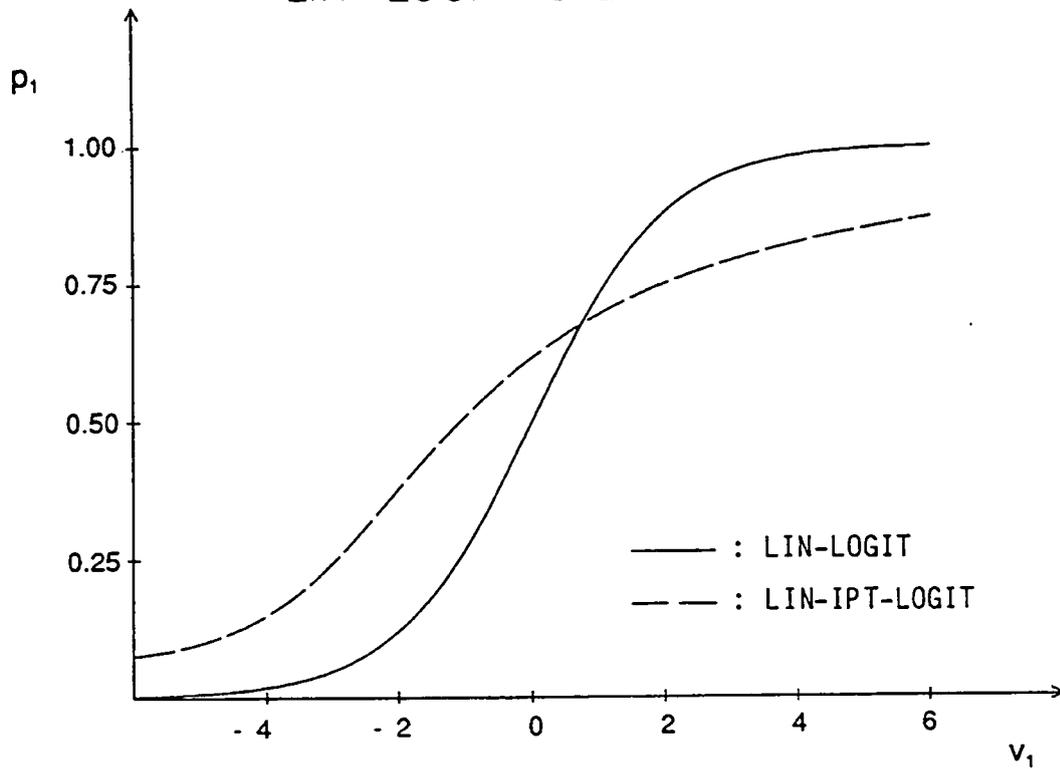
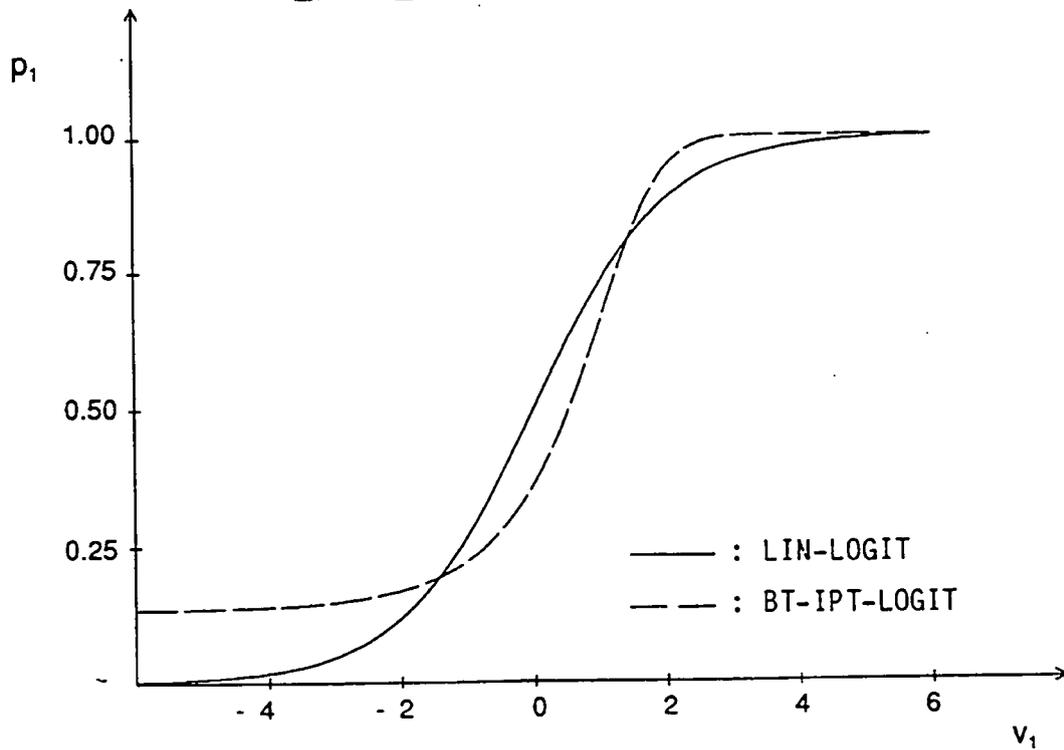


Figure 4

LIN-LOGIT vs BT-IPT-LOGIT



la droite ou par la gauche. La courbe de réaction du LOGIT linéaire indiquée en trait continu est toujours symétrique et à queues nulles.

### B. Dimensions innovatrices

Compte tenu de l'imperfection des modèles, il est utile de pouvoir tenir compte de "queues épaisses" de la probabilité de choix, ainsi que d'asymétries dans les fonctions de réaction: si par exemple on veut faire des prévisions sur l'impact d'un train à grande vitesse, il est important de pouvoir identifier des effets de seuil parce que ces trains impliquent des modifications très importantes des niveaux de service—qui nous amènent peut-être au delà du seuil. Les formulations considérées pour atteindre ces fins sont relativement simples. Du point de vue économique, une queue épaisse représente une consommation obligée, une captivité réelle, ou une incapacité du modèle à expliquer le comportement dans certaines régions de l'échantillon. Une asymétrie de la courbe de réaction—avec ou sans seuils—est la représentation graphique de nonlinéarités dans l'utilité.

Par ailleurs, nous préparons des méthodes d'estimation appropriées, tant pour les données individuelles que pour les données agrégées (Liem et Gaudry 1987, 1990). Plusieurs tests sur des données urbaines (Winnipeg, Santiago, Paris) et des tests sur des données interurbaines canadiennes (Gaudry 1989b) sont très probants et démontrent la présence de captivité ou d'effets de seuil (au sens large d'asymétries de la courbe de réaction).

### C. Utilisation et diffusion

L'algorithme P-2 pour les données désagrégées est utilisé par l'Institut national de recherche sur les transports et leur sécurité (I.N.R.E.T.S.) à Paris depuis 1987, notamment pour modéliser l'accès aux aéroports. L'Université Karlsruhe en République Fédérale d'Allemagne prévoit utiliser les deux approches (agrégée et désagrégée) et les logiciels correspondants dans une grande étude de la demande interurbaine multimodale dans ce pays qui sera terminée en juillet 1991.

Les caractéristiques très souples des distributions se prêtent aussi à des études de toxicologie ainsi qu'à l'étude de la résistance des matériaux, domaines où des chercheurs de l'Université de Stuttgart ont manifesté un intérêt d'application. Il est toutefois trop tôt pour faire rapport sur l'état de ces travaux.

## 5. CONCLUSION

Le lecteur intéressé à plus d'information sur les éléments du quartet "formulation-méthode économétrique-données-résultats" pertinent à chacun des modèles esquissés ici pourra consulter l'auteur.

Nous regroupons par ailleurs dans le progiciel interactif-graphique TRIO, disponible à la fin de 1991 en version SUN et en version PC-386, les algorithmes mentionnés plus haut, tant pour les modèles de niveaux que pour les modèles probabilistes et de parts (voir Liem et al.). Le progiciel permet une gestion et une analyse intégrée des formulations, des algorithmes, des données et des résultats.

#### REFERENCES

- Dagenais, M., Gaudry, M. and T.C. Liem, "Urban Travel Demand: the Impact of Box-Cox Transformations with Nonspherical Residual Errors", Transportation Research B 21, 6, 443-477, 1987.
- Fisher, F.M., "The Survival of the Passenger Train: the Demand for Railroad Transportation Between Boston and New York", A Priori Information and Time Series Analysis, North Holland, 118-148, 1962.
- Florian, M., and M. Gaudry, "A Conceptual Framework for the Supply Side in Transportation Systems", Transportation Research B 14, 1-2, 1-8, 1980.
- Florian, M., and M. Gaudry, "Transportation Systems Analysis: Illustrations and Extensions of a Conceptual Framework", Transportation Research B 17, 2, 147-154, 1983.
- Fos, G. und M. Gaudry, "Ein Strassenverkehrsnachfragemodell für die Bundesrepublik Deutschland", Zeitschrift für Verkehrswissenschaft 57, 3, 156-176, 1986.
- Fridstrøm, Lasse, Bjornskau, Torkel, Muskaug, Richard and Siv Ingebrigtsen, "The Determinants of Personal Injury Road Accidents in Norway: An Aggregate Modelling Approach", Working Paper Q-98, Institute of Transport Economics, Norwegian Centre for Transport Research, Oslo, Norway, January 1989.
- Gaudry, M., "The Demand for Public Transit in Montreal and its Implications for Transportation Planning and Cost-Benefit Analysis", Ph. D. Thesis, Economics Department, Princeton University, and University Microfilms, Ann Harbor, Michigan, 188 p., 1973.
- Gaudry, M., "An Aggregate Time-Series Analysis of Urban Transit Demand: the Montreal Case", Transportation Research 9, 4, 249-258, 1975.
- Gaudry, M., "Seemingly Unrelated Static and Dynamic Urban Travel Demands", Transportation Research 12, 3, 195-211, 1978.
- Gaudry, M., "Six Notions of Equilibrium and their Implications for Travel Modelling Examined in an Aggregate Direct Demand Framework", in Hensher, D. and P. Stopher, eds, Behavioral Travel Modelling, Croom Helm, Ch. 6, 138-163, 1979.

- Gaudry, M., "A Study of Aggregate Bi-Modal Urban Travel Supply, Demand, and Network Behavior Using Simultaneous Equations with Autoregressive Residuals", Transportation Research B 14, 1-2, 29-58, 1980.
- Gaudry, M., "The INVERSE POWER TRANSFORMATION LOGIT AND DOGIT mode choice models" Transportation Research B 15, 2, 97-103, 1981.
- Gaudry, M., "DRAG, un modèle de la Demande Routière, des Accidents et de leur Gravité, appliqué au Québec de 1956 à 1982". Publication #359, Centre de recherche sur les transports, Université de Montréal, octobre 1984, 216 pages. A paraître dans Accident Analysis and Prevention sous le titre "A Model of the Demand for Road Use, Accidents and their Severity applied to Quebec".
- Gaudry, M., "Responsibility for Accidents: Relevant Results Selected from the DRAG Model", Canadian Business Law Journal 16, 1, 21-33, 1989a.
- Gaudry, M., "Asymmetric Shape and Variable Tail Thickness in Multinomial Probabilistic Response: Three Model Type Families in a Quasi-Direct Format Application to Intercity Travel Demand with Aggregate Canadian Data". Centre de recherche sur les transports, June 11, 1989b.
- Gaudry, M. "Innovations économétriques appliquées aux transports", Présentation 42, La Société Royale du Canada, 77-90, 1990.
- Gaudry, M., "Measuring the Effects of the 1978 Québec Automobile Insurance Act with the DRAG Model", à paraître dans G. Dionne, ed., Contributions to Insurance Economics, Kluwer, 1991.
- Gaudry, M., Baldino, D. et T.C. Liem, "FRQ, un Fichier Routier Québécois". Publication #360, Centre de recherche sur les transports, Université de Montréal, octobre 1984, 225 pages.
- Gaudry, M. and M. Dagenais, "Heteroscedasticity and the Use of Box-Cox Transformations", Economics Letters 2, 3, 225-229, 1979a.
- Gaudry, M. and Dagenais M., "The DOGIT model" Transportation Research B 13, 2, 105-112, 1979b.
- Gaudry, M., and J.S. Kowalski, "Demand-Performance-Supply Equilibria in Centrally Planned Economies", à paraître dans Communist Economies 1990.
- Gaudry, M., Liem, T.C. and Y. Sabourin, "GAUSEQ: A Generalized Autoregressive Single Equation Procedure", Publication 214, Centre de recherche sur les transports, et Cahier #8122, Département de sciences économiques, Université de Montréal, 36 p., 1981.
- Gaudry, M. and T.C. Liem, "GAUMEQ: A Generalized Autoregressive Multiple Equation Procedure", Publication 215, Centre de recherche

- sur les transp rts, et Cahier #8123, Département de sciences économiques, Université de Montréal, 49 p., 1981.
- Gaudry, M. and M.J. Wills, "Estimating the Functional Form of Travel Demand Models", Transportation Research 12, 4, 257-289, 1978.
- Liem, T.C., Dagenais, M. and M. Gaudry, "L-1.1: A Program for Box-Cox Transformations in Regression Models with Heteroskedastic and Autoregressive Residuals", Publication 301, Centre de recherche sur les transports, et Cahier #8314, Département de sciences économiques, Université de Montréal, 70 p., 1983.
- Liem, T.C. and M. Gaudry, "PROBABILITY: The P-2 program for the Standard and Generalized BOX-COX LOGIT models with disaggregate data", Publication 527, Centre de recherche sur les transports, Université de Montréal, 1987 (en révision).
- Liem, T.C. and M. Gaudry, "SHARE: The S-2, S-3 and S-4 programs for the Standard and Generalized BOX-COX LOGIT and DOGIT and for the Linear and Box-Tukey INVERSE POWER TRANSFORMATION-LOGIT models with aggregate data", à paraître, 1990.
- Scott, Graeme, Pittams, Grant and Nigel Derby, "Regression Model of New Zealand Road Casualty Data: Results of a Preliminary Investigation", Transport Research Section, Ministry of Transport, May 1987.
- Skegg, D.C.G., Richards, S.M. and R. Doll, "Minor Tranquillisers and Accidents", British Medical Journal 1, 917-919, 1979.
- Zuckerman, S., "The influence of Sex Hormones on the Performance of Learned Responses", p. 34-44 in Hormones Psychology and Behaviour and Steroid Hormones Administration, Ciba Foundation Colloquia on Endocrinology, J. and A. Churchill Ltd, London, 380 p., 1952.