# Pour mieux comprendre les déplacements interrégionaux de voyageurs : un modèle multimodal de demande. Deuxième partie : Description du modèle et premiers résultats

par Roger MARCHE
*IRT*

INTRODUCTION -

Un précédent article (1) a présenté :

- les objectifs du modèle multimodal de demande en cours de développement à l'I.R.T. ;
- la conception générale du modèle, qui simule la mobilité et le choix modal, à partir d'échantillons de voyages et en fonction de "temps généralisés" ;
- les développements du modèle, en cours ou prévus à plus long terme : améliorations de la formulation, recueil de données de base nouvelles, élaboration de modèles plus agrégés.

Cette deuxième partie a pour but :

- d'apporter des précisions plus techniques sur la formulation du modèle et sur la méthode actuelle d'estimation des paramètres,
- de fournir les principaux résultats des premières applications aux voyages professionnels.

(1) Les Cahiers Scientifiques de la Revue Transports, n° 2, avril 1980.

## I - FORMULATION DU MODELE

Rappelons que, pour une relation "domicile (du voyageur) - destination (du voyage)" AB :

- dans une situation donnée (c'est-à-dire pour une offre de transport donnée et des caractéristiques des voyageurs également données et supposées connues pour un échantillon représentatif des voyages sur la relation), le modèle calcule d'abord les temps généralisés individuels à l'aller et au retour du voyage, pour les différents modes de transport possibles ;

- la simulation, sur l'échantillon des voyages, du choix modal d'après le minimum de la somme des temps généralisés à l'aller et au retour du voyage, compte tenu de la contrainte d'utilisation de la voiture à l'aller et au retour du voyage, permet de reconstituer le choix modal ;

- lorsque l'on envisage des modifications du niveau de service de l'offre de transport des différents modes ou/et des modifications des caractéristiques des voyageurs, le modèle simule les modifications des comportements de mobilité et de choix modal, en fonction des modifications des temps généralisés.

Nous nous proposons ici de décrire les spécifications du modèle, c'est-à-dire de préciser le calcul des temps généralisés, puis de discuter la prise en compte de leur influence sur la mobilité.

### I.1. - Les temps généralisés.

Rappelons que le temps généralisé, pour l'aller et le retour du voyage par un mode de transport donné, est $\tau = \theta/h$ où, pour le voyageur considéré :

- le "temps de trajet équivalent" $\theta$ résume les aspects temporels de l'offre sous la forme d'un équivalent en temps standard, perdu en transport ;

- le "prix équivalent" $\pi$ tient compte des "désutilités" attachées par le voyageur aux autres composantes du niveau de service ;

- ce prix équivalent est traduit en un équivalent en temps par l'intermédiaire du coût horaire h attaché par le voyageur à l'heure standard perdue ;

- les différentes composantes des temps généralisés sont des valeurs individuelles (attachées à chaque voyage), qui sont introduites dans la simulation par des lois de probabilité.

En complément aux idées directrices données dans le précédent article, nous nous proposons ici, pour les différentes composantes, de préciser :

- la forme des lois de probabilité retenues et les paramètres définissant ces lois de probabilité ;

- la forme des corrélations entre les valeurs de ces paramètres et les caractéristiques des voyageurs (qui sont résumées par le niveau de revenu r) et les paramètres correspondants.

## - TABLEAU 1 -

Liste des paramètres définissant les composantes individuelles du temps de trajet équivalent $\theta$

| COMPOSANTES du TEMPS de TRAJET EQUIVALENT | FORME de la LOI de PROBABILITE et PARAMETRES (1) | ELASTICITE -REVENU |
|---|---|---|
| Temps de porte à porte | | |
| - Transports terminaux pour les transports publics | $N(m,\sigma)$ (2) | $\mu'$ (3) |
| - Voiture | $N(m,\sigma)$ | |
| Neutralisation et pénalisations, transports publics | | |
| - Neutralisations trains de nuit | $N(m,\sigma)$ | |
| - Neutralisations services de jour (Restauration, travail, repos) | $N'(\sigma)$ | |
| - Coût horaire des écarts entre horaires souhaités et horaires réels : | | |
| . $\delta_1$ (arrivée en avance, retour retardé) | $N(m,\sigma)$ | |
| . $\delta_2$ (arrivée en retard, retour précipité) | $N(m,\sigma)$ | |
| - Pénalisations horaires pour heures indues | $N(m,\sigma)$, par tranche horaire (4) | |
| Temps psychologique voiture (5) : indicateur "goût de la conduite - fatigue" | $N(m,\sigma)$ | |
| Nuit supplémentaire : à la destination (transports publics ou voiture) ou en cours de trajet (voiture) | $N(m,\sigma)$ (6) | |

(1) Les notations utilisées sont les suivantes :

. N = loi normale ; LN = loi log-normale ; N' = demi-loi normale (valeurs positives dans une loi N de moyenne nulle ; traduisant une densité de probabilité décroissante),

. m = moyenne, $\sigma$ = écart-type (dans la loi N, directe ou correspondante).

(2) A moins de disposer de valeurs individuelles dans l'échantillon des voyages.

(3) Eventuellement, pour tenir compte de la puissance de la voiture, corrélée avec le niveau de revenu.

(4) Les valeurs doivent être cohérentes avec celles de $\delta_1$ et $\delta_2$.

(5) Extension éventuelle à transports publics (longs parcours en train).

(6) Dans le modèle actuel, cette pénalisation pour nuit supplémentaire a été introduite sous forme d'un équivalent en temps ; mais elle pourrait être introduite, à la place ou simultanément, dans le prix équivalent.

## - TABLEAU 2 -

Liste des paramètres définissant les composantes individuelles du prix équivalent $\pi$ et de h

| COMPOSANTES du PRIX EQUIVALENT | FORME de la LOI de PROBABILITE et PARAMETRES (1) | ELASTICITE REVENU |
|---|---|---|
| Coût ressenti pour l'utilisation de la voiture | N $(m,\sigma)$ | $\mu$ |
| Bonus comparés des différents modes (2) | | |
| - Voiture avec autoroutes à péage/voiture sans utilisation des autoroutes à péage (3) | N $(m,\sigma)$ | a' |
| - Train 1ère classe/train 2ème classe : | | |
| . Terme fixe (attitude sociale) | N $(m,\sigma)$ | a' |
| . Terme proportionnel à temps 2ème classe, entre gares (confort) | N $(m,\sigma)$ | a' |
| - Avion/train 1ère classe | N $(m,\sigma)$ | a' |
| Bonus "voiture" (utilisation à la destination (4) ) | N' $(\sigma)$ | |
| Bonus "voiture" accompagnement (par des personnes pour motif personnel) (5) | Coefficient multiplicateur $\rho$ appliqué au bonus "voiture" | |
| Coût horaire du temps h | LN $(m,\sigma)$ | a |

(1) Voir renvoi 1 du tableau 1.

(2) Par hypothèse, voiture sans utilisation des autoroutes à péage et train 1ère classe sont au même niveau (compte tenu de l'indicateur "goût de la conduite - fatigue").

(3) Bonus proportionnel au temps de parcours "route".

(4) Introduction dans le temps généralisé T' (choix du mode). Fonction croissante de la durée du voyage.

(5) L'accompagnement intervient déjà sur le coût ressenti, exprimé en coût par personne. Il serait envisageable d'introduire un terme lié à la distance ou au coût total d'utilisation de la voiture.

Il faut souligner que les hypothèses retenues sur la forme des lois sont certainement discutables mais que le point important est de tenir compte de la dispersion des comportements individuels et des corrélations avec le revenu ; les hypothèses sont certainement perfectibles, dans l'avenir, à partir des résultats d'enquêtes appropriées.

Ces précisions sont fournies par les tableaux 1 et 2, qui concernent plus particulièrement le cas des voyages professionnels. D'une manière générale :

- lorsque la forme des lois de probabilité est fixée, il reste deux paramètres à estimer ; une caractéristique de valeur centrale (par exemple la moyenne) et une caractéristique de dispersion ;
- compte tenu du fait que la distribution statistique des revenus r est approximativement "log-normale", les corrélations introduites entre les "désutilités unitaires" et le niveau de revenu sont des lois normales à deux variables, le logarithme du revenu et le logarithme de la désutilité unitaire ; ainsi, la pente de la droite de régression (du logarithme de la désutilité unitaire par rapport au logarithme du revenu) correspond, en première approximation, au coefficient d'élasticité de la désutilité unitaire par rapport au revenu.

### 1.2. - La prise en compte de la mobilité

Pour l'année n et dans la situation $S_i$ sur la relation domicile-destination AB, le modèle de demande (tous modes de transport) est :

$$D^i_{AB,n} = \underset{n}{K} (T_{AB}) \times E_{A,n} \times R_{B,n} \times F^i_{AB} \quad , \text{ où}$$

- . la demande $D^i_{AB,n}$ est le nombre annuel de voyages aller-retour ;
- . $F^i_{AB}$ représente le jeu de l'offre de transport et de la structure socio-économique des voyageurs sur la mobilité, par l'intermédiaire des temps généralisés individuels $\tau$, qui correspondent aux modes de transport utilisés par le voyageur à l'aller et au retour ; rappelons que le choix des modes est effectué d'après les minimum des temps généralisés $\tau'$ (temps généralisés corrigés par le bonus voiture) et donc que $\tau$ n'est pas le minimum des $\tau_{m_1,m_2}$ à l'aller et au retour du voyage ;
- . $E_A$ et $R_B$ sont le potentiel-émission de la zone A et le potentiel-réception de la zone B ;
- . $K(T_{AB})$ tient compte du niveau des échanges entre les zones A et B, compte tenu de leurs fonctions mutuelles dans l'armature régionale caractérisées par la typologie $(T_{AB})$.

Nous nous proposons :

- de préciser les hypothèses du modèle et d'expliciter les propriétés des fonctions introduites ;
- de décrire le fonctionnement de la simulation sur échantillons de voyages.

*a) La fonction de demande* $F^i_{AB}$

Par définition, la fonction de demande est :

$$F^i_{AB} = \int_{\tau=0}^{\tau=\infty} \varphi_i(\tau)\ f(\tau)\ d\tau \quad , \text{où :}$$

- $\varphi_i(\tau)$ est la densité de probabilité des voyages selon le temps génélisé $\tau$ ;
- $f(\tau)$ est la fonction de mobilité, traduisant l'influence des temps généralisés sur la demande.

Notons que si la structure des temps généralisés $\tau$ était la même sur toutes les relations AB (donc même densité de probabilité $\varphi_i(\tau)$, la structure géographique correspondrait à une "indépendance statistique" entre les zones A et B (simple produit des potentiels), ce qui s'exprime encore par l'idée d' "isotropie" (pour des potentiels unitaires des zones) ; avec, toutefois, une réserve concernant le niveau des besoins liés à la typologie $T_{AB}$. En d'autres termes, $F^i_{AB}$ est la fonction de demande "unitaire", c'est-à-dire pour des potentiels (émission et réception) unitaires, à la constante K $(T_{AB})$ près.

*b) La fonction de mobilité* f $(\tau)$

La fonction de mobilité $f(\tau)$ traduit l'influence du temps généralisé $\tau$ sur la fréquence annuelle des voyages du voyageur.

Il faut d'abord souligner que cette fonction a un caractère statistique, c'est-à-dire qu'il suffit qu'elle soit définie "en moyenne" et non au niveau de chaque individu. De manière plus précise :

- considérons un ensemble de voyageurs ayant la même valeur $\tau_1$, dans une situation $S_i$ ;
- dans la situation $S_j$, ces voyageurs auront des temps généralisés $\tau'$ qui suivront une densité de probabilité $\varphi_{j,\tau}(\tau')$ ;
- il faut et il suffit que la fonction de mobilité s'applique, en moyenne, pour tout sous-ensemble de voyageurs $(\tau,\tau')$.

A partir d'une situation $S_i$ sur la relation AB, définie par la densité de probabilité des voyages $\varphi_i(\tau)$, considérons des modifications des $\tau$ résultant de modifications du niveau de service de l'offre multimodale de transport ou/et de modifications des caractéristiques socio-économiques des (mêmes) voyageurs (par exemple du niveau de revenu ou de l'équipement en voitures). Ces modifications conduisent à une situation $S_j$, qui est entièrement définie par les probabilités conditionnelles $\varphi_{j,\tau}(\tau')$. En effet, nous avons :

$$F^i_{AB} = \int_{\tau=o}^{\tau=\infty} \varphi_i(\tau)\ f(\tau)\ d\tau \ ,$$

$$F^j_{AB} = \int_{\tau=o}^{\tau=\infty} \left( \varphi_i(\tau) \int_{\tau'=o}^{\tau=\infty} \frac{f(\tau')}{f(\tau)}\ \varphi_{j,\ \tau}(\tau')\ d\tau' \right) d\tau$$

Partant de $\varphi_i(\tau)$ et des $\varphi_{j,\tau}(\tau')$, cette dernière relation permet de calculer la demande $F^j_{AB}$ ainsi que la densité de probabilité $\varphi_j(\tau')$.

La fonction $f(\tau)$ est une fonction décroissante et, parmi les fonctions simples, il est naturel d'utiliser la fonction "puissance" classique des modèles gravitaires : $(f(\tau) = (\tau/\tau_o)^{-\alpha}$. C'est cette fonction qui est utilisée dans la version actuelle du modèle.

Mais une fonction "exponentielle négative", $f(\tau) = a^{-\lambda(\tau-\tau_o)}$ est également envisagée :

- dans la gamme des $\tau$ rencontrés dans la demande inter-régionale intérieure, les deux formes restent voisines, numériquement :
- la fonction exponentielle conduit à une plus grande cohérence interne du modèle car le mode de référence pour la définition des bonus ou malus est indifférent, ce qui n'est pas le cas avec la fonction puissance.

### c) *La situation de référence* $S_o$ *et la signification des potentiels-émission*

Choisissons un "temps généralisé de référence" $\tau_o$, pour l'aller-retour, quelconque mais fixé (par exemple : $\tau_o$ = l'unité du temps, soit 1 heure, ou encore $\tau_o$ = 10 heures). Avec les deux fonctions de mobilité définies précédemment, nous avons $f(\tau_o) = 1$ et la fonction $f(\tau)$ est parfaitement déterminée : elle ne dépend que de son paramètre ($\alpha$ ou $\lambda$).

Considérons une situation $S_o$, que nous appellerons "situation de référence", qui correspondrait à la valeur $\tau_o$ du temps généralisé pour tous les voyages. Dans la situation $S_o$, nous avons $F^o_{AB} = 1$, donc : $D^o_{AB} = K_n(T_{AB}) \times E_{A,n} \times R_{B,n}$. Nous retrouvons la propriété d'indépendance statistique ou d'isotropie mentionnée précédemment.

Mais si nous partons de la situation connue $S_i$ (par exemple la situation actuelle connue par un échantillon de voyages), nous obtenons :

$$D^o_{AB} = D^i_{AB} \times \int_{\tau=o}^{\tau=\infty} \varphi_i(\tau)\ /\ f(\tau)\ d\tau.$$

Considérons les relations issues de A vers les destinations B correspondant à une même typologie ($T_{AB}$) (par exemple les relations de l'agglomération parisienne vers les différentes métropoles), pour lesquelles nous prendrons K ($T_{AB}$) = 1 (puisque k, $E_A$ et les $R_B$ sont définis à des facteurs multiplicateurs près). Supposons également que les potentiels-réception des différentes zones B soient connus. Il apparaît que le potentiel émission de la zone A est égal à la demande dans la situation de référence ramenée à un potentiel unitaire de la zone B.

Pour être plus précis, et avant de décrire le fonctionnement de la simulation sur échantillon, il convient d'expliciter les hypothèses concernant : les potentiels-réception, la prise en compte des catégories socio-professionnelles des voyageurs, l'influence du temps généralisé sur la durée du voyage. Naturellement, des modifications de ces hypothèses pourront intervenir dans les développements ultérieurs du modèle, si ces modifications devaient s'avérer pertinentes pour expliquer les différences significatives qui pourraient apparaître entre le fonctionnement du modèle et la réalité.

### d) *Les potentiels-réception*

Il est fait l'hypothèse que $R_B = \lambda E_A$ et même, puisque $E_B$ et $R_B$ sont définis à un facteur multiplicateur près, que $R_B = E_B$ :

- cela est raisonnable a priori (dans le cas des voyages professionnels), puisque ces potentiels caractérisent le "niveau de développement socio-économique" de la zone,
- cela est déjà justifié par l'expérience, par le fait que lorsque le modèle calcule, à partir de la situation actuelle, les demandes $D^o_{AB}$ et $D^o_{BA}$ pour la situation de référence, ces demandes sont effectivement très proches ($E_A = R_A$ et $E_B = R_B$ entraînant $D^o_{AB} = D^o_{AB}$),
- s'il apparaissait des différences significatives entre les demandes $D^o_{BA}$ et $D^o_{AB}$, il serait possible d'en tenir compte, au moins en grande partie, en introduisant un écart dans les termes K ($T_{AB}$) et K($T_{BA}$) ;

### e) *Les catégories socio-professionnelles*

Pour les voyages professionnels comme pour les voyages personnels, la mobilité est très variable selon les catégories socio-professionnelles. Naturellement, le modèle en tient compte puisqu'il part de la population des voyages et non de la population des voyageurs. Notons qu'une partie de ces différences est prise en compte par la corrélation entre le coût horaire du temps et le niveau de revenu : les catégories plus mobiles correspondent aux revenus les plus élevés qui entraînent des temps généralisés plus faibles.

Dans le modèle actuel, la même fonction de mobilité f($\tau$) (même valeur de son paramètre) est utilisée pour les différentes catégories socio-professionnelles.

Enfin, on doit se demander s'il ne faudrait pas utiliser des potentiels-réception et des valeurs de $K(T_{AB})$ différentes selon les catégories socio-professionnelles. Supposons que nous partions d'un modèle "désagrégé" :

$$D_{AB,n,C.S} = K_{n,C.S.}(T_{AB}) \times E_{A,n,C.S.} \times R_{B,n,C.S.} \times F_{AB}$$

Il est important de souligner que l'agrégation ne suppose pas que $R_B$ et $K(T_{AB})$ sont les mêmes pour toutes les catégories socio-professionnelles mais que, dans la typologie $T_{AB}$ considérée, il existe une même échelle des $R_B$ comme des $T_{AB}$ selon les catégories socio-professionnelles :

- dans ces conditions, comme les $E_A$, $R_B$ et $T_{AB}$ sont définis à un facteur multiplicateur près, il est légitime de fixer les mêmes valeurs de $R_B$ et $K(T_{AB})$ pour les différentes catégories socio-professionnelles : le potentiel-émission est déterminé en conséquence ;
- cette hypothèse de même échelle est assez peu restrictive puisque nous sommes à l'intérieur d'une même typologie des relations.

### *f) La durée et la fréquence des voyages*

Rappelons que :

- la durée des voyages est corrélée positivement avec le temps généralisé ;
- en sens inverse, la fréquence des voyages (fréquence annuelle des voyages pour un voyageur donné) est corrélée négativement avec le temps généralisé ; cette corrélation est l'un des éléments de l'augmentation de la mobilité lorsque $\tau$ diminue, mais il faut souligner que la fonction $f(\tau)$ a une signification plus large puisqu'elle introduit à la fois l'augmentation de la fréquence des voyages et l'apparition de nouveaux voyageurs.

Dans le modèle, l'influence des temps généralisés est introduite :

- sur la durée du voyage : elle est nécessaire pour le calcul du bonus voiture, qui intervient dans le choix du mode et qui est une fonction croissante de la durée du voyage ;
- éventuellement, sur la fréquence des voyages afin d'améliorer la prise en compte des prix des transports publics, dans le cas des cartes d'abonnement.

Comme pour la fonction de mobilité $f(\tau)$, des fonctions du type "puissance" ou "exponentielle" sont utilisées. Notons que, comme la simulation porte sur les voyages, ces fonctions sont appliquées individuellement, alors que l'introduction de $f(\tau)$ n'a qu'un caractère de valeur moyenne.

Nous avons analysé précédemment la structure du modèle et la possibilité de reconstituer des situations de références $S_o$, correspondant à des temps généralisés individuels égaux à $\tau_o$. Ces propriétés du modèle sont utilisées pour "transposer" les voyages d'une relation à l'autre, à l'intérieur d'une même typologie, par exemple pour les relations entre l'agglomération parisienne et les agglomérations des métropoles régionales : pour la simulation de la demande sur chaque relation, tant pour l'estimation des paramètres que pour les applications, on utilise l'ensemble des échantillons de voyages sur les différentes relations, ce qui présente deux avantages :

- l'un théorique : meilleure cohérence du modèle, à l'intérieur de la typologie,
- l'autre pratique : possibilité d'obtenir une précision donnée (car la simulation sur échantillons comporte des erreurs aléatoires, liées à la taille des échantillons) avec un faible nombre de voyages, de quelques centaines, sur chaque relation ; cet avantage est double : utilisation d'enquêtes portant sur des échantillons limités, réduction du temps d'ordinateur pour la mise en œuvre des simulations.

## II - METHODE D'ESTIMATION DES PARAMETRES

En complément aux idées directrices décrites dans le précédent article, nous préciserons la méthode d'estimation des paramètres. Rappelons qu'il s'agit de la méthode actuelle, constituant à opérer par approximations successives dans les simulations, et qu'il est prévu, dans les phases ultérieures, de formuler des "équations de demande" adéquates plus agrégées et d'en estimer les paramètres par des méthodes appropriées d'estimation statistique.

### II.1 - Estimation des paramètres sur la répartition modale.

Les tableaux 1 et 2 précédents fournissent la longue liste des paramètres introduits dans le modèle. Certains d'entre eux ont pu être fixés a priori :

- soit en fonction de l'expérience acquise ou d'enquêtes limitées qui ont pu être réalisées, notamment en ce qui concerne : les valeurs moyennes des pénalisations et neutralisations, les valeurs des élasticités-revenus $\mu$ et $\mu'$ ;
- soit en fonction d'hypothèses raisonnables, notamment en ce qui concerne les écarts-types des lois de probabilité ainsi que certaines élasticités-revenus ($a' = 1$ ; $a = 1$).

En définitive, les 11 paramètres estimés par approximations successives sont :

- la moyenne et l'écart-type du coût ressenti pour l'utilisation de la voiture ;
- les 2 paramètres définissant la loi du coût horaire du temps en fonction du revenu : dans la loi (Log r, Log h), paramètre de niveau K et écart-type résiduel $\sigma$ ;

- les 5 paramètres définissant les niveaux moyens des bonus : autoroute/route, 2 termes du bonus train 1ère classe/train 2ème classe, écart-type du bonus voiture et coefficient multiplicateur $\rho$ (dans les travaux ultérieurs, il est prévu d'estimer le niveau de bonus avion/train 1ère classe, ce qui conduira à un 12ème paramètre) ;

- les 2 coefficients d'élasticité par rapport au temps généralisé $\tau$ de la mobilité (paramètre $\alpha$ de la fonction $f(\tau) = (\tau/\tau_o)^{-\alpha}$) et de la durée du voyage (avec une loi $(\tau/\tau_o)^{\beta}$).

La combinaison "optimale" des 11 paramètres est recherchée dans la reconstitution de la répartition modale pour les 9 relations Paris-Métropoles (entre agglomérations), qui représentent des situations très contrastées en ce qui concerne la distance et les modes de transport en présence.

Le critère retenu pour le "meilleur" ajustement est $\Sigma_{(AB)}\ {}_m\ \Sigma/P_m - f_m/\text{minimum}$, $f_m$ et $P_m$ étant les fréquences modales (sur une relation AB), observées et estimées par la simulation, respectivement (7 modes : avion, 4 modes train, 2 modes voiture).

La recherche de la combinaison optimale s'effectue par approximations successives, en s'aidant toutefois d'un plan d'expérience (du type "carré gréco-latin") pour réduire le nombre des combinaisons à simuler. En fait :

- la valeur de $\beta$ a été cernée rapidement, après les premiers essais,

- pour $\alpha$, nous nous attendons à une valeur voisine de 1,5 à 2 (expérience des modèles "gravitaires"),

- les valeurs de K et $\sigma$ se localisent relativement bien à partir des relations à longue distance (présence de l'avion) ; notons cependant une certaine indétermination : en diminuant K (c'est-à-dire en augmentant la valeur moyenne de h), $\sigma$ est diminué ;

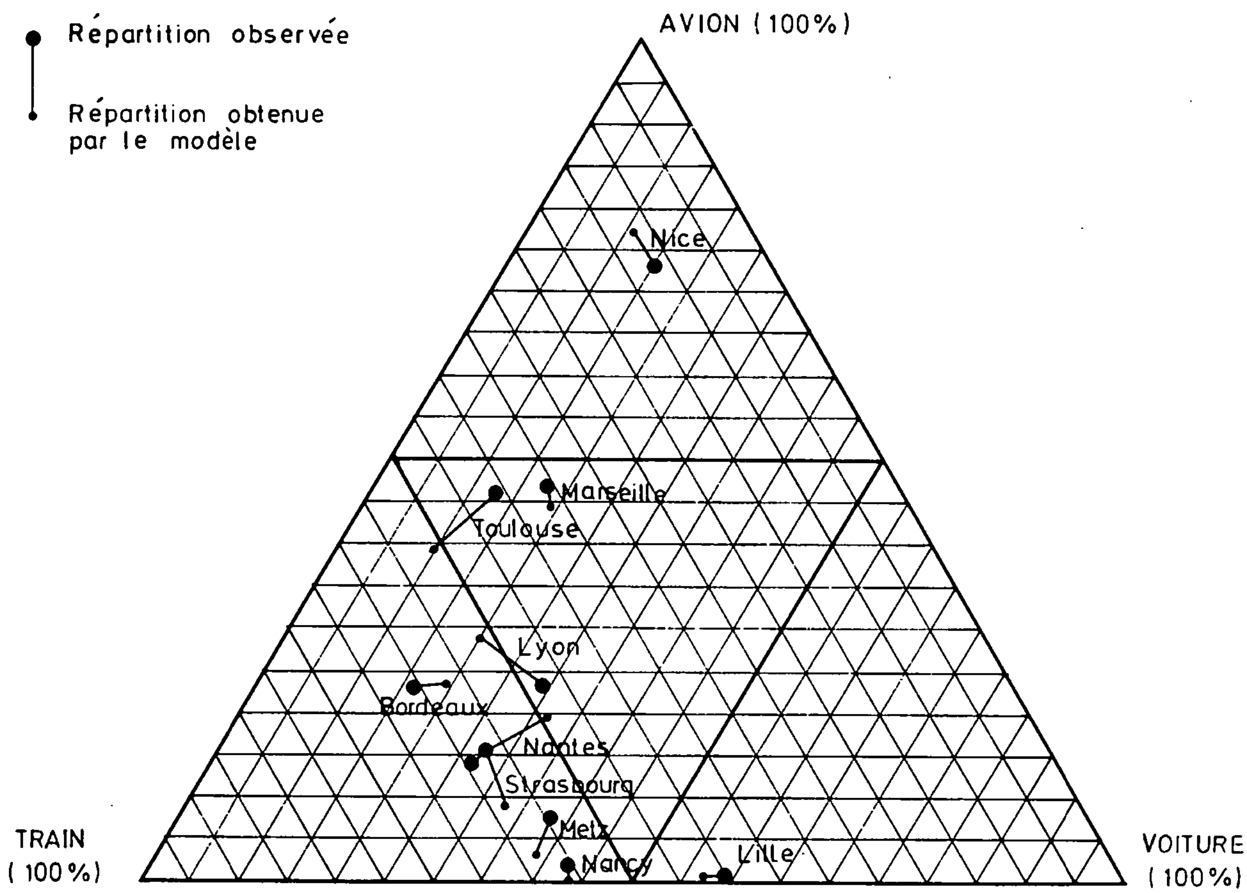
- l'équilibre entre le coût ressenti pour l'utilisation de la voiture et le bonus voiture s'effectue compte tenu du nombre de personnes voyageant ensemble pour motif professionnel ;

- les valeurs moyennes des 2 termes du malus fer 2/fer 1 et la valeur moyenne du bonus autoroute/route sont ajustées ensuite ;

- le facteur $\rho$ est estimé à partir du groupe-cible correspondant à un accompagnement pour motif personnel.

La figure 1 illustre la qualité de l'ajustement sur les 9 relations "Paris → métropoles", pour les voyages professionnels (situation 1968-69 connue par les enquêtes "Voyageurs" réalisées dans le cadre de la préparation du 6ème Plan). Il faut noter que les écarts, relativement faibles, ne sont pas dus uniquement à l'aptitude du modèle à reconstituer la réalité, mais aussi à des imprécisions dans la demande observée.

FIGURE 1 - Répartition modale (%)




On notera que, dans cette représentation triangulaire, les points se situent au voisinage d'une courbe qui traduit le fait que la part de marché de chacun des 3 modes de transport est très corrélée avec la distance ou le temps généralisé moyen.

En ce qui concerne les valeurs numériques des paramètres, nous noterons que lorsque le revenu est exprimé en montant annuel, le coefficient K est de l'ordre de 2000 à 2500 , c'est-à-dire voisin de la durée annuelle du travail : ainsi, le coût horaire du temps apparaît voisin du revenu horaire et donc très inférieur au coût de l'heure de travail.

### II.2 - Tests a posteriori du modèle

Après estimation des paramètres pour les relations de chacune des typologies pour lesquelles les données étaient disponibles, notamment les relations Paris-métropoles et les relations métropoles-Paris, un certain nombre de tests ont été effectués a posteriori, que nous décrirons brièvement.

#### *a) Structure interne du modèle*

La simulation de la situation de référence $S_o$, décrite précédemment, a montré que la structure des voyages selon les 3 variables du tableau trimensionnel était très voisine pour les différentes relations, ce qui justifie la transposition des voyages d'une relation à l'autre.

#### *b) Extension géographique*

Un exemple est illustré par la figure 1 : sur la relation Paris-Nice, la part élevée de l'avion est très bien reconstituée, bien que la situation de cette relation corresponde à une application du modèle en dehors de la gamme des situations (Paris-métropoles) utilisées pour l'estimation des paramètres.

#### *c) Groupes-cibles*

Outre la bonne reconstitution des durées moyennes des voyages et des fréquences annuelles des voyages, un test important est celui de la reconstitution des revenus des voyageurs des différents modes, qui a été conduite en comparant les moyennes des distributions de Log r, observée et calculée par le modèle, ainsi que leurs écarts-types.

L'excellente reconstitution des niveaux moyens (voir figure 2) fut pour les auteurs du modèle, une grande et heureuse surprise. En effet, le modèle reproduit correctement des variations de niveau de revenu allant de 1 à plus de 3, lorsque l'on passe des voyageurs en voiture ou en train 2ème classe aux voyageurs en avion. Ce résultat montre qu'il n'y a rien d'anormal dans l'ensemble des corrélations en fonction du revenu introduites dans le modèle.

#### *d) Niveau de la demande sur les différentes relations*

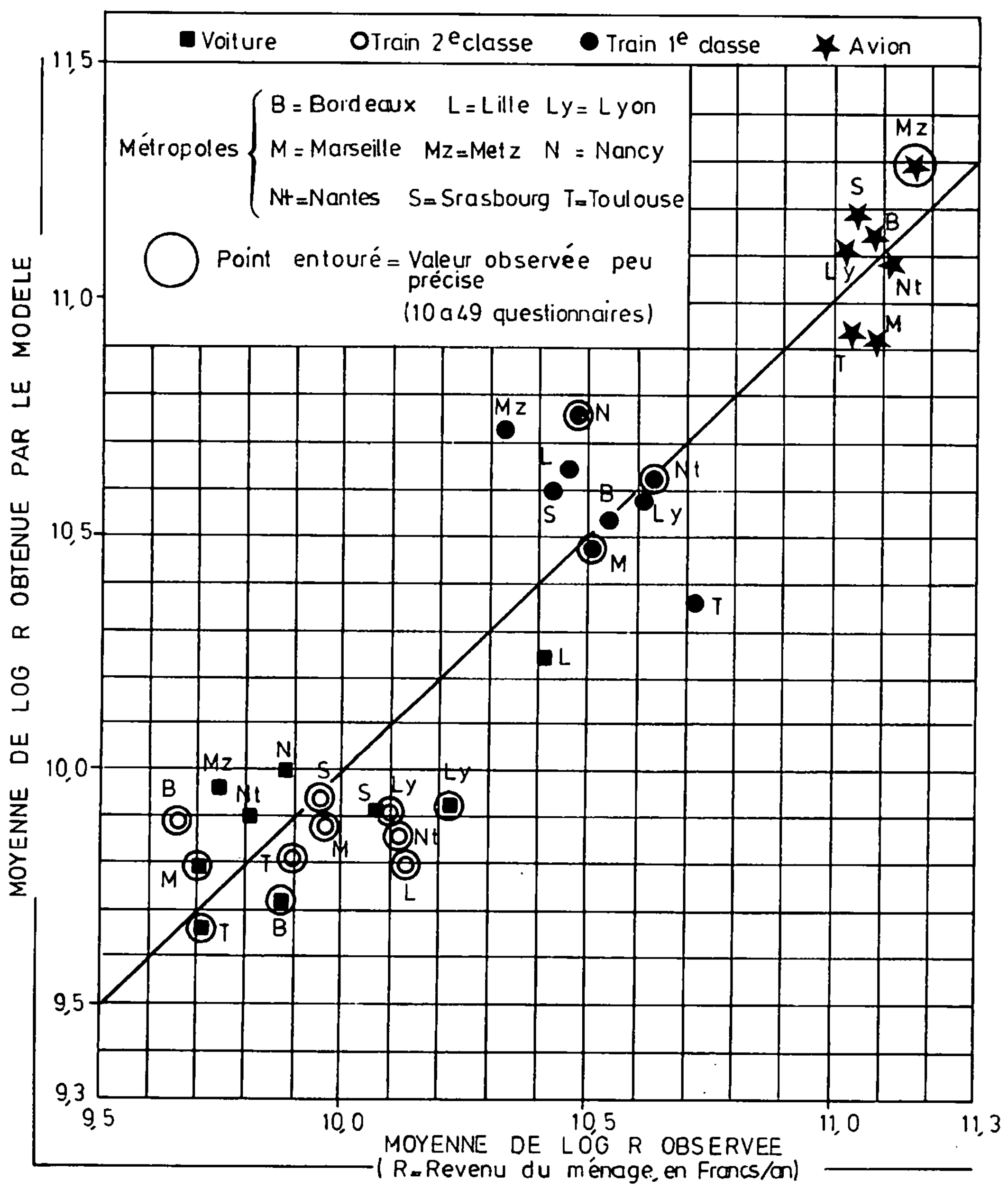
Le modèle reconstitue bien non seulement la structure des voyages (points a et c précédents) mais également le niveau de la demande sur les différentes relations, compte tenu de l'hypothèse $R_B = E_B$.

Toutefois :

- au stade des essais actuels, la valeur de $\alpha$ ne peut pas être estimée de manière très précise : les valeurs 1,5 et 2 sont aussi acceptables l'une que l'autre ; il est espéré que les travaux ultérieurs effectués avec une meilleure cohérence interne du modèle conduiront à une valeur plus précise ;

- comme il a été indiqué dans le précédent article, l'estimation de α sur coupe instantanée pose des problèmes pour l'application à court terme ou à moyen terme.

FIGURE 2 - Niveau de revenu par mode de transport (relations Paris-métropoles)



*e) Influence des aléas individuels et de l'échantillon de base.*

Les résultats de la simulation comportent des erreurs d'échantillonnage dont l'importance a été étudiée :

- d'une part, en effectuant plusieurs tirages indépendants des valeurs individuelles issues des lois de probabilité ;
- d'autre part, en divisant les échantillons de voyages de la situation actuelle en deux parties, de manière à constituer des échantillons indépendants.

Nous mentionnerons simplement :

- que les résultats obtenus sont en accord avec la théorie de l'échantillonnage ;
- qu'avec un nombre relativement faible de voyages, de l'ordre de 500 pour la typologie Paris-métropoles, la précision obtenue est très satisfaisante, tant pour l'estimation de la répartition modale que pour l'estimation du niveau de revenu ; pour la simulation des valeurs individuelles, l'écart-type sur les pourcentages modaux est de l'ordre de 1 à 2 % et le coefficient de variation du niveau de revenu est de l'ordre de 5 %.

## III - PREMIERES APPLICATIONS -

Nous indiquerons les principaux résultats des premières applications aux voyages professionnels (situation 1968-69).

### III.1 - Sensibilité de la demande à l'offre

Le tableau 1 fournit les sensibilités de la demande aux variations du niveau de service des différents modes, sous la forme des élasticités directes et croisées par rapport aux prix de transport et au temps de trajet équivalent (les élasticités directes sont soulignées).

Ces résultats ne doivent être considérés qu'en tant qu'ordres de grandeur :

- les coefficients d'élasticité sont variables d'une relation à l'autre, en fonction de la part de marché de chacun des modes dans la situation initiale ;
- compte tenu de l'interprétation à donner au paramètre $\alpha$, les valeurs absolues de ces élasticités sont plutôt à considérer comme des valeurs maximum pour des applications à court terme ;
- les améliorations prévues du modèle (meilleure cohérence interne, introduction d'un bonus, positif ou négatif, avion/train 1ère classe) devraient conduire à réduire quelque peu les sensibilités ;

- les calculs ont été effectués avec des variations relativement faibles des prix et temps de transport (± 20 %, au maximum) et il n'est pas certain que les valeurs des élasticités resteraient valables pour des modifications plus importantes, ce que les travaux ultérieurs devraient permettre d'étudier.

TABLEAU 1 - Coefficients d'élasticité de la demande (Voyages professionnels 1968-69 - Ensemble des relations domicile-destination Paris-métropoles, entre agglomérations)

| Elasticités par rapport à : | Mode de transport | | | |
|---|---|---|---|---|
| | Avion | Train | Voiture | TOTAL |
| Temps de trajet équivalent : | | | | |
| . avion | -0,8 | 0,2 | 0,02 | -0,03 |
| . train | 1,3 | -1,1 | 0,4 | -0,2 |
| . voiture | 0,3 | 0,6 | -1,3 | -0,2 |
| Prix de transport | | | | |
| . avion | -1,5 | 0,4 | 0,05 | -0,05 |
| . train | 0,7 | -0,9 | 0,3 | -0,2 |
| . voiture | 0,1 | 0,3 | -0,8 | -0,1 |

III.2 - Concurrence et complémentarité des modes

Même sur les relations Paris-métropoles, pour lesquelles la "concurrence" entre modes est élevée, il est important de souligner que les modes sont largement complémentaires car leur clientèle dépend notamment de la taille du groupe de voyage et du niveau de revenu des voyageurs.

Afin de mettre en évidence cet aspect de complémentarité, des demandes "unimodales" ont été calculées, correspondant à la présence d'un seul des 7 modes de transport (des demandes pourraient être également simulées pour des regroupements tels que ceux correspondant aux 3 secteurs : avion, train, voiture). L'ensemble de ces rapports des demandes unimodales à la demande multimodale peut servir de base pour le calcul d'un "indice de complémentarité" des modes, par exemple en faisant la moyenne de ces rapports ; les modes sont d'autant plus complémentaires, sur une relation donnée, que cette moyenne est plus faible.

Une autre façon de mesurer la complémentarité est de mesurer la demande supplémentaire apportée par chaque mode : on calcule la demande partielle après suppression d'un mode et on la compare à la demande tous modes. Cette méthode est plus complète car elle caractérise mieux l'apport mutuel des différents modes, mais elle est un peu plus complexe car il faut traiter parallèlement plusieurs hypothèses.

Au cours de travaux ultérieurs, il sera intéressant d'étudier la corrélation entre ces niveaux de demande unimodale ou partielle (par rapport à la demande multimodale) et les niveaux de service des différents modes, caractérisés par exemple par le temps généralisé moyen (pour l'ensemble des usagers dans l'hypothèse d'une offre unimodale). En fait, cet objectif est très voisin de la recherche de modèles de demande agrégés évoquée au cours du précédent article.

### III.3 - Les bénéfices des usagers

Les prix moyens de transport multipliés par les volumes correspondants de la demande, les traductions en termes pécuniaires des temps de trajet équivalent et des avantages ou inconvénients comparés des modes sont les éléments de base pour les bilans élargis dans une optique de rentabilité pour la collectivité. Il reste cependant quelques problèmes d'ordre théorique à résoudre pour une prise en compte pertinente des transferts entre modes et des demandes "induites".

Nous indiquerons ici quelques résultats généraux concernant la part dans le temps généralisé de ses différentes composantes, pour les usagers des différents modes (situation 1968-69 pour les relations entre agglomérations Paris-métropoles) :

- le temps de trajet équivalent $\theta$ est, en moyenne, légèrement inférieur au temps de transport de porte à porte t pour le train, par suite des neutralisations (sommeil, repas, temps utilisable) qui compensent largement les pénalisations (écarts entre horaires souhaités et horaires réels, heures indues) : l'écart atteint près de 10 % pour les relations à longue distance, avec une large utilisation des trains de nuit ; pour la voiture et l'avion, c'est l'inverse : $\theta$ est supérieur à t, de 15 à 25 % ;

- dans le temps généralisé $\tau'$, le temps de trajet équivalent $\theta$ joue un rôle important, confirmant l'importance du temps pour les voyages professionnels ; toutefois, cette part est de l'ordre de 50 % seulement : d'une relation à l'autre, elle est relativement stable pour la voiture et pour le train et plus variable pour l'avion, ayant tendance à décroître pour les relations à longue distance notamment, parce que le coût horaire du temps h est un peu plus faible.

Si les travaux ultérieurs conduisent à augmenter sensiblement le coût horaire du temps h (introduction du bonus avion/fer 1, actualisation des résultats pour une période plus récente) la part de $\theta$ dans $\tau$ devrait augmenter.