



# UNIVERSITÉ DES SCIENCES ET TECHNOLOGIES DE LILLE

Faculté des Sciences Économiques et Sociales

ANNEE 2001

## MODÉLISATION DU CHOIX MODAL VOYAGEURS SUR LES DÉPLACEMENTS LONGUE DISTANCE : LA VALEUR DU TEMPS

### THESE

Pour obtenir le grade de

**Docteur en Sciences Économiques**

Présentée et soutenue publiquement

Le 19 décembre 2001

par

**Hakim HAMMADOU**

devant le jury composé de

|                 |   |                                                                                        |
|-----------------|---|----------------------------------------------------------------------------------------|
| Alain BONNAFOUS | : | Professeur à l'Université Lumière Lyon 2, Rapporteur                                   |
| Hubert JAYET    | : | Professeur à l'Université des Sciences et Technologies de<br>Lille, Directeur de Thèse |
| Jean-Loup MADRE | : | Directeur de Recherche à l'INRETS                                                      |
| Emile QUINET    | : | Professeur à l'École Nationale des Ponts et Chaussées                                  |
| Daniel SERRA    | : | Professeur à l'Université de Montpellier, Rapporteur                                   |
| Daniel SZPIRO   | : | Professeur à l'Université des Sciences et Technologies de<br>Lille                     |



L'Université des Sciences et Technologies de Lille n'entend donner aucune approbation, ni improbation aux opinions émises dans cette thèse. Les opinions doivent être considérées comme propres à leur auteur.

## REMERCIEMENTS

Comment remercier par des mots les personnes qui m'ont aidé, d'une manière ou d'une autre au cours de ces années de thèse ? J'espère avoir su leur dire combien leur aide et leur soutien m'ont été précieux.

Je tiens à remercier particulièrement Hubert Jayet, mon directeur de thèse. Sa compétence, sa disponibilité et sa gentillesse m'ont apporté la motivation nécessaire pour mener à bien mes recherches, sans jamais négliger les aspects pratiques et humains de la situation de thésard, ce qui à mes yeux est une qualité rare.

Je remercie aussi Florence pour son soutien moral et les encouragements qu'elle a su m'apporter tout au long de cette recherche. Qu'elle sache toute l'amitié que je lui porte.

J'attache une importance particulière à exprimer ma gratitude à Sonia Paty, Sabine Kazmierczak, Carine Drapier, Dominique Rajaonarison et Mehdi Massrour qui ont eu la gentillesse de m'apporter les observations et remarques constructives dans la rédaction de cette thèse.

Je suis redevable envers les membres des Laboratoires MEDEE et CLERSE qui ont participé à créer une atmosphère de recherche à la fois chaleureuse et dynamique.

Je remercie également Christian Calzada et Michel Houée du Ministère de l'Équipement des Transports et du Logement pour avoir initié cette recherche, fourni les données et financé une partie du travail. Leurs expériences dans le domaine des transports et les discussions engagées dans le cadre de mes travaux ont été d'un apport considérable.

Enfin, ma gratitude va aux membres du jury qui ont bien voulu apporter leurs commentaires et évaluer ce travail.

« Ne faut-il pas avoir perdu du temps pour en  
apprécier la valeur ? »

Jacques Lamarche, extrait de confessions d'un  
enfant d'un demi-siècle (1977).



# TABLE DES MATIERES

|                            |   |
|----------------------------|---|
| TABLE DES MATIÈRES .....   | 1 |
| INTRODUCTION GÉNÉRALE..... | 4 |

---

## PREMIÈRE PARTIE LITTÉRATURE THÉORIQUE ET MODÈLES DE BASE .....14

---

|                                                                                                |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| INTRODUCTION .....                                                                             | 15 |
| CHAPITRE 1 L'ANALYSE THÉORIQUE DU CHOIX MODAL ET LA VALEUR DU TEMPS .....                      | 17 |
| 1.1 <i>La théorie de l'affectation optimale des ressources monétaires et temporelles</i> ..... | 19 |
| 1.1.1 Le temps comme ressource homogène : le modèle de Becker (1965).....                      | 19 |
| 1.1.2 Du temps comme ressource à la valeur d'une économie de temps.....                        | 24 |
| 1.1.3 L'apport de la théorie de la productivité marginale : Hensher (1995).....                | 34 |
| 1.1.4 Une prise en compte intégrée transport-activités : le modèle de O'Dea (1994) .....       | 36 |
| 1.2 <i>Les applications du modèle général à l'analyse du choix modal</i> .....                 | 40 |
| 1.2.1 Le modèle de Train et McFadden (1978).....                                               | 40 |
| 1.2.2 Le modèle de Bates et Roberts (1986) .....                                               | 41 |
| 1.2.3 Une généralisation.....                                                                  | 44 |
| 1.2.4 Détection d'un effet revenu dans le choix modal .....                                    | 45 |
| 1.2.5 Une théorie unifiée du déplacement et des activités.....                                 | 47 |
| 1.2.6 La proposition de Causse (1999).....                                                     | 50 |
| 1.3 <i>Conclusion</i> .....                                                                    | 54 |

## CHAPITRE 2 LES TECHNIQUES D'ESTIMATION ÉCONOMÉTRIQUES : USAGE DES CHOIX DISCRETS POUR

|                                                                                    |    |
|------------------------------------------------------------------------------------|----|
| L'ANALYSE DU CHOIX MODAL .....                                                     | 56 |
| 2.1 <i>Modélisation désagrégée du choix modal</i> .....                            | 58 |
| 2.1.1 Le modèle de choix discrets.....                                             | 58 |
| 2.1.2 Modèle logit multinomial (MNL) : du modèle logit classique au BC-logit ..... | 61 |
| 2.1.3 Modèles logit conjoint et emboîté .....                                      | 64 |
| 2.1.4 Modèle probit multinomial.....                                               | 71 |
| 2.1.5 Modèles à paramètres aléatoires.....                                         | 74 |
| 2.2 <i>Estimation des modèles</i> .....                                            | 78 |
| 2.2.1 Le principe du maximum de vraisemblance.....                                 | 78 |
| 2.2.2 Estimation des modèles Logit classique et emboîté .....                      | 79 |
| 2.2.3 Estimation du modèle Probit.....                                             | 81 |
| 2.3 <i>Tests de significativité statistique</i> .....                              | 86 |
| 2.3.1 Statistique de Student t.....                                                | 86 |
| 2.3.2 Test d'ajustement global .....                                               | 87 |
| 2.3.3 Mesure de la qualité des estimations.....                                    | 88 |

|                                        |                                          |    |
|----------------------------------------|------------------------------------------|----|
| 2.3.4                                  | Un test de la propriété IIA .....        | 89 |
| 2.4                                    | <i>Interprétation des modèles</i> .....  | 90 |
| 2.4.1                                  | Calcul des utilités marginales : .....   | 90 |
| 2.4.2                                  | Calcul des probabilités marginales ..... | 91 |
| 2.4.3                                  | Calcul des élasticités .....             | 92 |
| 2.4.4                                  | Calcul de la valeur du temps .....       | 93 |
| 2.5                                    | <i>Conclusion</i> .....                  | 93 |
| CONCLUSION DE LA PREMIÈRE PARTIE ..... |                                          | 94 |

---

## DEUXIEME PARTIE UNE APPLICATION DU CHOIX MODAL DE TRANSPORT SUR LA LONGUE DISTANCE.....95

---

|                                                                                           |     |
|-------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| INTRODUCTION .....                                                                        | 96  |
| CHAPITRE 3 LE CHOIX D'UN ÉCHANTILLON ET LA CONSTRUCTION D'UNE BASE D'OFFRE.....           | 98  |
| 3.1 <i>Construction de l'échantillon et statistiques descriptives</i> .....               | 99  |
| 3.1.1 Construction de l'échantillon .....                                                 | 99  |
| 3.1.2 Statistiques descriptives .....                                                     | 101 |
| 3.2 <i>Construction de la base d'offre</i> .....                                          | 112 |
| 3.2.1 Caractéristiques générales de l'offre de transport interrégional de voyageurs ..... | 112 |
| 3.2.2 La base d'offre .....                                                               | 116 |
| 3.3 <i>Conclusion</i> .....                                                               | 125 |
| CHAPITRE 4 RÉSULTATS D'ESTIMATION DU CHOIX MODAL VOYAGEUR .....                           | 126 |
| 4.1 <i>La représentation de la fonction d'utilité</i> .....                               | 128 |
| 4.1.1 Transformation de Box et Cox .....                                                  | 128 |
| 4.1.2 Modèle à coefficients aléatoires .....                                              | 131 |
| 4.1.3 Linéarité du temps .....                                                            | 133 |
| 4.2 <i>Choix du modèle économétrique</i> .....                                            | 138 |
| 4.2.1 Logit simple ou logit conditionnel ? .....                                          | 138 |
| 4.2.2 Le modèle logit emboîté .....                                                       | 146 |
| 4.2.3 Choix de segmentation des déplacements .....                                        | 148 |
| 4.3 <i>Agrégation des résultats désagrégés</i> .....                                      | 155 |
| 4.3.1 Méthode d'agrégation directe .....                                                  | 155 |
| 4.3.2 Méthode d'énumération complète .... ..                                              | 157 |
| 4.3.3 Méthode TALVITIE (1973) .....                                                       | 160 |
| 4.3.4 Intégration explicite .....                                                         | 161 |
| 4.3.5 Énumération d'échantillons aléatoires .....                                         | 163 |
| 4.3.6 Segmentation de marché .....                                                        | 164 |
| 4.4 <i>Conclusion</i> .....                                                               | 167 |

|                                                                                                  |     |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| CHAPITRE 5 EVALUATION DE LA VALEUR DU TEMPS .....                                                | 168 |
| 5.1 <i>Evaluation de la valeur du temps</i> .....                                                | 169 |
| 5.1.1 Confrontation du modèle de Becker et De Serpa .....                                        | 170 |
| 5.1.2 La proposition de Truong et Hensher (1985b) .....                                          | 173 |
| 5.1.3 Modèle de Jara-Diaz et Videla (1989).....                                                  | 178 |
| 5.1.4 La proposition de Causse (1999).....                                                       | 180 |
| 5.1.5 Vers une intégration plus explicite du revenu dans la fonction de la valeur du temps ..... | 186 |
| 5.2 <i>Valeur du temps et choix modal</i> .....                                                  | 189 |
| 5.2.1 Estimation du modèle complet avec une spécification logit emboîté.....                     | 190 |
| 5.2.2 La comparaison entre modèles .....                                                         | 192 |
| 5.2.3 Segmentation selon le motif de déplacement .....                                           | 194 |
| 5.3 <i>Etude de l'effet des variables explicatives sur le choix modal</i> .....                  | 198 |
| 5.3.1 Effets sur l'utilité de chacun des modes de transport .....                                | 198 |
| 5.3.2 Analyse des effets marginaux sur la probabilité de choix d'un mode .....                   | 203 |
| 5.3.3 les élasticités directes et croisées.....                                                  | 206 |
| 5.4 <i>Conclusion</i> .....                                                                      | 209 |
| CONCLUSION DE LA SECONDE PARTIE .....                                                            | 210 |
| CONCLUSION GENERALE .....                                                                        | 211 |
| TABLE DES GRAPHIQUES .....                                                                       | 215 |
| LISTE DES TABLEAUX .....                                                                         | 216 |
| ANNEXES.....                                                                                     | 218 |
| BIBLIOGRAPHIE .....                                                                              | 236 |

## INTRODUCTION GENERALE

### *Pourquoi a-t-on besoin d'une évaluation de la valeur du temps ?*

Dans la mesure où le financement des grandes infrastructures de transport est largement le fait des instances publiques, qu'elles soient locales, nationales ou internationales, l'amélioration du bien-être social devient un critère essentiel de décision. De manière triviale, cela signifie que l'intérêt de tous ceux qui bénéficient ou pâtissent de la mise en place du projet doit être pris en considération. Il faut en préciser l'impact (ainsi que celui du projet concurrent), non seulement sur les usagers du mode de transport considéré, mais aussi sur les usagers des autres modes de transports, les tiers ainsi que les entreprises de transport et les gestionnaires d'infrastructures, l'Etat et les collectivités locales.

D'où l'importance des procédures d'évaluation. Dans le cas particulier des infrastructures de transport, l'obligation d'y recourir préalablement à toute décision et leur cadre juridique sont inscrits dans la Loi d'Orientation des Transports Intérieurs de 1982 (LOTI):

*« Les choix relatifs aux infrastructures, équipements et matériels de transport et donnant lieu à financement public, en totalité ou partiellement, sont fondés sur l'efficacité économique et sociale de l'opération. Ils tiennent compte des besoins des usagers, des impératifs de sécurité et de protection de l'environnement, des objectifs du plan de la Nation et de la politique d'aménagement du territoire, des nécessités de la défense, de l'évolution prévisible des flux de transport nationaux et internationaux,*

*du coût financier et, plus généralement, des coûts économiques réels et des coûts sociaux dont ceux des atteintes à l'environnement. Les grands projets d'infrastructures et les grands choix technologiques sont évalués sur la base de critères homogènes intégrant les impacts des effets externes des transports relatifs notamment à l'environnement, à la sécurité et à la santé et permettant de procéder à des comparaisons à l'intérieur d'un même mode de transport et entre différents modes ou combinaisons de modes. Ces évaluations sont rendues publiques avant l'adoption définitive des projets concernés... » (Journal Officiel du 31 décembre 1982, page 4004. Loi n° 82-1153 du 30 décembre 1982).*

Comme on peut le constater, le calcul économique public, qui fournit des critères de choix rationnels, joue un rôle central dans les procédures d'évaluation. Ce qui est conforme à la position défendue par les rédacteurs du rapport Boiteux (2001), pour lesquels : *« le calcul économique, malgré ses insuffisances, est encore ce qu'il y a de mieux pour évaluer des projets d'investissements. Mais comme tous les effets d'un projet ne peuvent être monétarisés, ni restreints à un chiffre unique, il convient de compléter les critères quantitatifs de rentabilité par des tests de sensibilité aux hypothèses et par une description soigneuse des éléments non-incorporables dans les calculs, et des effets attendus du projet. Cette façon de faire est préférable à une présentation multicritères qui a l'inconvénient de donner implicitement un même poids à chacun des éléments décrits quantitativement ».*

On ne saurait cependant négliger le fait que dans le secteur des transports comme pour d'autres types d'équipements publics, les procédures d'évaluation sont conçues avant tout comme une aide à la décision. Elles ne sauraient en aucun cas se substituer aux arbitrages politiques. En conséquence, les procédures utilisant ce calcul doivent être élaborées en étroite collaboration entre économistes et décideurs politiques desquels elles doivent être comprises et acceptées. L'enjeu est en effet de permettre des comparaisons à partir desquelles un débat peut être ouvert sur des bases rationnelles, ce qui exige une grande transparence afin que soit établie une séparation claire entre ce qui relève de l'appréciation politique, et ce que l'état de l'art permet d'évaluer.

A cette fin depuis la promulgation de la LOTI, un effort de réflexion a été entrepris sous l'égide de Marcel Boiteux (2001), qui définit les grands axes de la mise en œuvre des

méthodes de calcul économique. Sur la base d'un certain nombre de principes : la préférence à accorder au critère de choix unique, l'attention à porter au choix de la solution de référence, l'adoption de valeurs unitaires de comportement de préférence aux valeurs tutélaires, l'intégration des effets sur l'environnement sous forme monétaire. Il précise également la nature des indicateurs à calculer, et les principes de leur détermination. Sur ces bases, le Ministère de l'Équipement, des Transports et du Logement élabore des directives précisant, pour chaque mode, les procédures de calcul à mettre en œuvre. Ces directives sont établies de façon à tenir compte des spécificités propres à chaque mode et à rendre les méthodes suffisamment similaires pour que leurs résultats permettent des comparaisons intermodales.

### ***Les applications (CBA) et les dispositifs institutionnels***

Les méthodes mises en œuvre relèvent de l'analyse coûts-bénéfices-avantages (ci-après CBA). Utilisant les résultats standards de l'économie du bien être, cette méthode consiste à évaluer monétairement les coûts et avantages socio-économiques d'un projet en agrégeant les dispositions à payer de ses utilisateurs potentiels, qu'il s'agisse de personnes privées ou d'entreprises.

En général, avec la réduction des coûts d'insécurité, la principale amélioration qu'apporte la réalisation d'un projet de transport est la diminution des durées de déplacement entre les zones qui sont desservies par le projet et, indirectement, entre celles qui peuvent être liées par un itinéraire passant par l'infrastructure concernée. Pour déterminer la composante positive de l'impact, l'analyse CBA va donc chercher à déterminer ce que les futurs usagers sont prêts à payer pour cette économie de temps, disposition à payer qui s'explique par de nombreux facteurs comme l'objectif du déplacement, la distance parcourue, le mode utilisé, la situation urbaine et interurbaine, le temps de déplacement ou temps d'attente, le revenu personnel et d'autres incitations ou restrictions économiques. C'est dire que la mesure de la ou des valeurs du temps, définies comme la quantité de ressources matérielles que les usagers sont prêts à sacrifier pour disposer d'une unité de temps supplémentaire, joue un rôle central dans les processus d'évaluation.

Avant de nous intéresser plus précisément aux problèmes que pose cette mesure des valeurs du temps, il est bon de rappeler trois points importants sur les méthodes CBA dans lesquelles elles s'insèrent :

1. Les CBA sont généralement utilisées pour évaluer des projets ponctuels. Les résultats fournissent des orientations utiles pour savoir quels investissements doivent être réalisés selon des critères de coûts et d'efficacité. Le résultat doit également servir à évaluer a posteriori des investissements plus importants. Les décideurs sont ainsi en mesure de tirer des enseignements des réussites ou des erreurs passées. Peu de pays appliquent le font de manière systématique.
2. La méthodologie CBA permet de comparer des projets alternatifs ou de décider de l'utilité d'un projet par rapport à l'existant. Aussi, les alternatives au projet à évaluer doivent-elles être très clairement et précisément définies. En particulier, il faut tenir compte de l'existant et se demander si, plutôt que de construire une nouvelle liaison, on ne peut pas résoudre le problème plus simplement par l'aménagement des infrastructures existantes.
3. L'application de la CBA à un projet routier doit tenir compte de l'ensemble des modifications des conditions de circulation, y compris sur les itinéraires autres que celui qui est couvert par le projet analysé. Il faut en particulier mesurer l'accroissement de la circulation et son impact, notamment sur l'environnement et la sécurité routière ce qu'actuellement l'analyse des projets routiers fait rarement. A défaut, on risque de surestimer les avantages nets en termes de temps de déplacements et de coût, alors que les avantages en termes de sécurité et d'environnement sont généralement sous-estimés dès lors qu'aucune attention n'est accordée à l'accroissement de la circulation. Il ne s'agit pas ici d'une faiblesse inhérente aux CBA. Les principes des CBA peuvent facilement être appliqués de manière à prendre en compte l'accroissement de la circulation. Il s'agit plutôt d'une mauvaise utilisation de la CBA, dans laquelle le biais découlant de la commodité de calcul n'a pas été pris en compte de façon adéquate.

### ***Pourquoi des valeurs du temps révélées ?***

#### *Valeur révélée, valeur tutélaire et valeur déclarée*

Comme noté plus haut, les valeurs du temps sont un ingrédient essentiel du calcul des bénéfices que tirent les usagers d'un projet. Il est donc nécessaire qu'elles soient soigneusement choisies et que les valeurs effectivement utilisées soient clairement explicitées

dans les documents d'évaluation. Mais quelles valeurs utiliser et comment les déterminer ? La valeur tutélaire, qui peut se définir comme la valeur que l'Etat, dans « sa sagesse », attribue aux citoyens, est de moins en moins utilisée. Le débat de fond entre ses partisans et les tenants de l'utilisation d'une valeur comportementale du temps, peut être résumé de la manière suivante : « *Pour les premiers (les partisans d'une valeur comportementale, NDLR), dans une société basée sur la libre décision des agents, il ne semble pas justifié que l'Etat détermine une valeur à attribuer au temps sans se référer aux comportements des usagers... Pour les seconds (les partisans d'une valeur tutélaire, NDLR), le calcul économique peut fort bien utiliser des valeurs tutélaires, pour les biens comme le temps, dont la valeur individuelle représente mal l'intérêt pour la collectivité* »<sup>1</sup>.

Ce débat peut être aujourd'hui considéré comme clos. L'intérêt d'une valeur reflétant les préférences effectives des usagers l'emporte en effet aujourd'hui largement sur les arguments avancés par les tenants d'une valeur tutélaire, à savoir l'existence d'une surévaluation systématique par les individus du temps gagné et d'autre part, la remise en question de la rareté du bien temps dans une société cruellement touchée par un chômage en hausse continue. L'un comme l'autre peuvent en effet être pris en compte lors de la détermination de valeurs comportementales par des méthodologies adéquates.

Une fois écartées les valeurs tutélaires, il faut choisir une procédure pour calculer des valeurs comportementales. On dispose ici de deux grandes familles de méthodes, celles qui sont fondées sur les préférences déclarées (PD) et celles qui reposent sur les préférences révélées (PR). L'opposition entre les deux repose sur la manière de collecter l'information relative aux choix des usagers. Les analyses de préférences déclarées sont effectuées en interrogeant des personnes utilisatrices. L'utilisateur est directement sollicité pour évaluer la valeur des caractéristiques des modes de transport. Dans les analyses de préférences révélées, on étudie les arbitrages effectifs des agents, notamment à la suite de diverses améliorations ou modifications du système de transport. La valeur du temps est estimée à partir de la modélisation du trafic et d'une batterie de paramètres.

D'un point de vue logique, parce qu'elle repose sur l'analyse de comportements réels, l'estimation des préférences révélées semble le plus à même de rendre compte de l'impact

---

<sup>1</sup> Extrait de Quinet, Touzery et Triebel (1989), page 35.



qu'une variation des attributs modaux peut avoir sur le comportement de l'utilisateur et donc de la valeur du temps. A priori, c'est donc la meilleure méthode. L'analyse des préférences déclarées souffre en effet des biais induits par le mode de perception qui souvent déforme les valeurs réelles pour donner des valeurs perçues. La phase de retranscription de l'information privative de l'utilisateur à l'enquêteur reste sujette à des erreurs systématiques de report, involontaires dans le cas d'erreurs de retranscription ou volontaires dans le cas de justifications ex-post du choix.

On ne peut cependant négliger le fait, que nous illustrerons amplement dans cette thèse, que les résultats de l'analyse des préférences révélées dépendent des modèles économétriques utilisés pour analyser le comportement des individus et leurs arbitrages face au temps de transport relativement aux autres variables. Tant les variables explicatives utilisées que la représentation mathématique de leurs effets influencent fortement les résultats. De plus, la possibilité d'adapter chaque questionnaire à un objectif d'étude spécifique a permis à la méthodologie des préférences déclarées de gagner en efficacité. Un examen de 105 études menées au Royaume-Uni de 1980 à 1990 (Wardman, 1998) aboutit à la conclusion qu'il existe désormais un bon niveau de correspondance entre préférences déclarées et révélées. Etant donnée l'infériorité du coût d'une analyse de préférences déclarées, cette méthode est actuellement la plus développée dans les pays anglo-saxons.

### ***Les insuffisances des évaluations actuellement disponibles des valeurs révélées et l'apport de la théorie***

Actuellement en France, il n'existe pas réellement de méthode uniformisée pour l'évaluation des infrastructures interurbaines de transport. Les maîtres d'ouvrage imposent ou appliquent des modèles de trafic très divers. Et ces modèles, différents selon le mode de transport, sont généralement monomodaux. Or, l'expérience anglo-saxonne montre que cette méthode n'est pas satisfaisante, les comparaisons avec les modes de transport alternatifs restant une nécessité. De plus, chaque modèle utilise des valeurs du temps spécifiques, rendant les comparaisons des résultats difficiles. C'est ainsi que, jusqu'à une période récente, la Direction de la Prévision et la Direction des Routes aboutissaient régulièrement à des résultats divergents sur la rentabilité de projets donnés et le classement de projets alternatifs.

Seul le modèle MATISSE<sup>2</sup> (annexe n°1), développé dans une optique de long terme, prend en compte explicitement les trois modes (air, fer, route) et, à l'intérieur d'un même mode, les différences entre les réseaux, ce qui lui permet de prévoir l'impact d'une modification de l'offre de transport sur le trafic domestique de chaque mode. On trouvera dans le tableau ci-dessous les valeurs du temps utilisées pour chacun de ces modes<sup>3</sup>.

**Valeur du temps en interurbain (1998) par voyageur (en euro par heure)**

| Mode       | Pour des distances inférieures à |        | Pour les distances $d$<br>Comprises entre<br>50 km ou 150 km et 400 km | Stabilisation pour les<br>distances supérieures<br>à 400 km |
|------------|----------------------------------|--------|------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------|
|            | 50 km                            | 150 km |                                                                        |                                                             |
| Route      | 8,4 €                            | -      | $50 \text{ km} < d \text{ VDT} = (d/10+50) \cdot 1/6,56$               | 13,7 €                                                      |
| Fer 2° Cl. | -                                | 10,7 € | $150 \text{ km} < d \text{ VDT} = 1/7(3d/10+445) \cdot 1/6,56$         | 12,3 €                                                      |
| Fer 1° Cl. | -                                | 27,4 € | $150 \text{ km} < d \text{ VDT} = 1/7(9d/10+1125) \cdot 1/6,56$        | 32,3 €                                                      |
| Aérien     | -                                | -      | - 45,7 €                                                               | 45,7 €                                                      |

Source Boiteux (2001).

Aussi, comme le note le Ministère de l'Équipement des Transports et du Logement, il y donc un réel besoin de disposer, pour la France, de modèles de choix modal sur la longue distance, qui intègrent explicitement le calcul de la valeur du temps en s'appuyant sur les expériences étrangères, notamment anglo-saxonne. Celles-ci nous apprennent que :

- La valeur du temps est croissante avec la durée et la longueur du déplacement ;
- La valeur du temps est croissante avec le caractère « contraint » du déplacement ;
- La valeur du temps est croissante avec le revenu, mais avec une élasticité inférieure à l'unité ;
- La valeur du temps est croissante dans le temps, mais également avec une élasticité inférieure à l'unité par rapport à la consommation finale des ménages par tête ;
- La valeur du temps pour motif professionnel est sensiblement plus élevée que la valeur du temps pour les déplacements domicile/travail ou pour autre motif professionnel.

Or, en France, il est rare que les déterminants ci-dessus soient explicitement pris en compte. Ce qui explique pour une bonne partie l'usage de valeurs du temps différentes d'un modèle à l'autre et donc des résultats divergents sur la rentabilité de projets.

C'est dans ce cadre que s'inscrit le travail présenté dans cette thèse. En nous appuyant sur l'enquête transport 93-94 (annexe n°2) fournie par le Ministère, nous faisons une analyse

<sup>2</sup> développé en France par l'Institut National de la Recherche et des Etudes sur les Transports et la Sécurité.

détaillée des modèles choix modal des voyageurs sur les déplacements longue distance. Nous utilisons ensuite les résultats de cette modélisation pour calculer explicitement les valeurs du temps qui en découlent.

La thèse s'articule en deux parties respectivement de deux et trois chapitres chacune. La première partie commence par dresser un état des lieux complets des modèles microéconomiques d'affectation des ressources monétaires et temporelles ainsi que de la théorie des choix discrets. Ce qui nous permet de baser les modèles économétriques sur des fondements microéconomiques rigoureux, issus de la théorie des choix individuels de transport.

Le premier chapitre est consacré à la présentation des théories usuelles dans ce domaine. Il se subdivise en deux sections. La première s'intéresse à la théorie générale de l'affectation des ressources monétaires et temporelles pour un ensemble d'activités dont le transport n'est qu'une composante. Nous partirons du modèle de base, celui de Becker (1965), pour aboutir à un des modèles les plus récents, proposé par O'Dea (1994), qui intègre et généralise les autres approches. La seconde section portera plus précisément sur la question du choix modal. Nous montrerons comment notre problématique générale s'applique plus particulièrement à l'analyse du choix du mode de transport par les voyageurs. Deux types d'approches peuvent être dégagées : la première, qui porte plus sur des problématiques de déplacement domicile-travail sur des aires urbaines, aboutit à des valeurs qui s'expriment en fonction du taux de salaire (Train et McFadden (1978), Jara-Diaz (1994)). Elle reste difficilement applicable sur les déplacements de la longue distance. La seconde s'oriente plutôt vers une application aux déplacements interurbains, et s'appuie sur le modèle de De Serpa (1971). Les extensions proposées à partir de ce modèle nous conduisent à des valeurs du temps qui peuvent tenir compte de l'effet du revenu, de la durée du trajet et du prix du déplacement.

Le deuxième chapitre présente les différentes méthodes économétriques d'estimation des choix modaux. Nous mettons d'abord l'accent sur les problèmes de formulation économétrique d'un modèle et sur les conséquences qui en découlent pour les méthodes d'estimation : choix d'une forme fonctionnelle, choix entre modèle logit standard et modèle

---

<sup>3</sup> On notera que ses auteurs passent sous silence le mode de calcul de ces valeurs.

logit conditionnel, conséquence de l'abandon de l'hypothèse d'indépendance entre termes aléatoires et estimation de modèles logit emboîtés et de modèles probit.

La seconde partie se consacre à l'apport principal de ce travail, à savoir la présentation des résultats des analyses empiriques sur l'estimation d'un modèle de choix modal et sur l'évaluation de la valeur du temps.

L'estimation rigoureuse de modèles de choix modal exige une bonne description de l'offre à laquelle chacun fait face. En effet, dans une optique de modélisation du choix modal du voyageur, l'usager choisit le mode de transport qui lui assure un niveau d'utilité maximal. Pour réaliser ce choix, il a besoin de connaître parfaitement l'utilité associée à chacun des modes de transport. Il faut donc définir les temps et coût de transport qui constitueront une partie importante de la donnée. On se doit alors de caractériser l'offre modale pour pouvoir déterminer, par une approche économétrique, de quelle manière ses caractéristiques déterminent le choix modal. Pour des raisons de temps et de coût, il était exclu de construire cette description sur l'ensemble de l'enquête. Nous avons donc utilisé un extrait, basé sur des critères géographiques (la proximité d'une desserte par le TGV), dont le troisième chapitre présente le mode de construction, conjointement avec les variables descriptives de l'offre à laquelle chaque voyageur de l'échantillon est confronté.

Dans le quatrième chapitre, notre objectif consiste à rechercher la modélisation économétrique qui permet de retranscrire au mieux le choix modal des voyageurs. Nous confrontons les différents modèles entre eux, et testons plusieurs spécifications afin de déterminer celles ayant un sens, tant d'un point de vue économique que statistique. Notre étude portera sur la concurrence entre la route, le fer et l'avion. De plus, à la fin de ce chapitre, nous nous attarderons sur les différentes techniques d'agrégation des choix individuels, afin de procéder à des simulations du choix modal en fonction de variables socio-économiques.

Enfin, le dernier chapitre se consacre à l'évaluation de la valeur du temps des voyageurs sur des déplacements longue distance. Nous y reprenons les différentes propositions concernant la forme fonctionnelle de la valeur du temps présentées dans le premier chapitre, qu'il est difficile de départager sur un plan purement théorique. L'objectif de l'analyse économétrique

de ce chapitre est en conséquence de s'appuyer sur les résultats des tests économétriques afin de les classer selon leur degré de pertinence par rapport au problème traité. Pour chacune d'entre elles, nous faisons une estimation et des tests économétriques et nous calculons les valeurs du temps correspondantes. Ce qui fait apparaître une grande diversité dans les valeurs obtenues. Sur la base des tests, nous faisons cependant des propositions quant à celles des valeurs qui nous paraissent le mieux approcher les comportements des usagers de l'échantillon.

**PREMIERE PARTIE**  
**LITTERATURE THEORIQUE ET MODELES DE BASE**

# INTRODUCTION

La valeur du temps d'un individu est définie comme le taux marginal de substitution entre les ressources matérielles et les ressources temporelles. On l'appréhende à partir de comportements tels que le choix du mode de transport. Ce constat soulève le questionnement séquentiel suivant :

- quel cadre théorique microéconomique faut-il privilégier pour définir une forme fonctionnelle de la valeur du temps ?
- parmi les outils empiriques disponibles, quelle modélisation économétrique faut-il utiliser pour l'évaluation de cette forme fonctionnelle ?

Cette première partie tente de répondre à ces deux questions.

Ainsi, le premier chapitre s'emploie à apporter une réponse à la première interrogation soulevée. Il sera consacré à la présentation des théories usuelles dans ce domaine. Nous présenterons de la théorie générale de l'affectation des ressources monétaires et temporelles. Nous montrerons que le modèle de De Serpa (1971) est une généralisation directe du modèle classique de comportement du consommateur sans dimension temporelle. Il existe bien évidemment d'autres types de théorisation, notamment ceux en terme de capital humain (Becker, 1965). Cependant, le caractère directement opératoire du premier lui confère une supériorité indéniable. De plus, les extensions proposées à partir de ce cadre théorique nous conduisent à des valeurs du temps qui peuvent tenir compte de l'effet du revenu, de la durée du trajet et du prix du déplacement.

Dans le second chapitre nous présentons la méthodologie économétrique qui permettra d'estimer les formes fonctionnelles définies dans le premier chapitre. Nous utiliserons pour cela la théorie des choix discrets, qui a pour objet de décrire le comportement en présence

d'actions mutuellement exclusives. On peut considérer que le nombre des facteurs intervenant au moment précis du choix est si élevé que le modélisateur ne parvient à en considérer qu'un sous-ensemble relativement restreint. Le choix de tel ou tel mode de transport se fera par la comparaison du coût généralisé qui est associé à chacun d'eux. L'individu choisira donc le mode de transport  $i$  qui lui assure un coût minimum. Ces modèles calculent la probabilité qu'un individu sélectionne une modalité particulière, étant données l'informations disponibles. De ce fait, ils répondent parfaitement à la problématique du choix modal.



# **CHAPITRE 1**

## **L'ANALYSE THEORIQUE DU CHOIX MODAL**

### **ET LA VALEUR DU TEMPS**

Le temps n'a fait son apparition dans l'analyse économique que dans les années soixante (Becker, 1965). Il ne s'agit plus seulement d'un repère chronologique des événements, mais aussi d'une ressource. En effet, toute activité économique demande du temps. Cependant, les ressources temporelles ne sont pas illimitées. Une nouvelle contrainte est donc introduite dans les modèles économiques, traduisant, comme pour les ressources matérielles, que les quantités consommées de temps ne peuvent excéder les quantités disponibles. Un nouveau problème se pose alors : celui de l'allocation "optimale" des ressources en temps.

A cette même période, alors que l'économie publique prend son essor, les économistes se préoccupent de définir et d'évaluer la rentabilité sociale des projets publics. Or, dans le secteur des transports, les investissements publics exercent une influence sur la disponibilité des ressources temporelles dans la mesure où elles font "gagner du temps" aux divers agents économiques. De la volonté de disposer d'une mesure commune pour mesurer les coûts et avantages d'une infrastructure publique de transport est née le concept de "valeur du temps". Ce dernier se base sur le constat selon lequel les individus opèrent des substitutions entre leurs ressources matérielles et leurs ressources temporelles. Ainsi, on considère qu'en travaillant, ils aliènent un temps qu'ils pourraient consacrer à des activités plus agréables, et ce afin d'accroître leurs ressources matérielles. Inversement, lorsqu'ils choisissent un mode de transport rapide mais coûteux, on admet que cette consommation n'est pas une fin en soi, mais un moyen d'augmenter les ressources temporelles disponibles pour des activités "finales", au prix d'un renoncement à une partie des ressources matérielles disponibles pour

ces mêmes activités finales. La valeur du temps d'un individu est alors définie comme le taux marginal de substitution entre ressources matérielles et ressources temporelles. On l'appréhende à partir de comportements tels que le choix d'un mode de transport particulier dans une gamme de modes possibles différenciées par leur rapidité et leur coût. Il s'agit du taux ainsi révélé que l'on introduit ensuite dans les calculs normatifs de rentabilité d'investissements publics dans le domaine des transports.

Ce chapitre est consacré à la présentation des théories usuelles dans ce domaine. Il se subdivise en deux parties. La première s'intéresse à la théorie générale de l'affectation des ressources monétaires et temporelles pour un ensemble d'activités dont le transport n'est qu'une composante. Nous partirons du modèle de base, celui de Becker (1965). La notion de valeur du temps qui en découle s'applique quelle que soit l'activité choisie. Nous évoquerons ensuite quelques unes de ses extensions. L'introduction de contraintes spécifiques aux modes de transport intégrée dans le modèle de De Serpa (1971), nous permettra de distinguer plusieurs mesures de la valeur du temps, en particulier sa valeur en tant que ressource, analogue à celle de Becker (1965), et la valeur d'une économie de temps, variable d'un mode à l'autre. Nous examinerons également la proposition d'Evans (1972), dont l'intérêt consiste à relier entre eux les temps consacrés à différentes activités. Nous verrons ensuite comment Hensher (1995) traite la distinction entre temps de travail et temps personnel. Cette section se terminera par le modèle de O'Dea (1994) qui intègre et généralise les autres modèles.

La seconde partie portera plus précisément sur la question du choix modal. Nous montrerons comment notre problématique générale s'applique plus particulièrement à l'analyse du choix du mode de transport par les voyageurs. Cette application repose néanmoins sur des restrictions implicites qui conduisent à des valeurs du temps qui ne dépendent pas de la durée de déplacement. Le modèle de Train et McFadden (1978) est l'un des premiers à intégrer de manière explicite le choix modal domicile-travail. Nous présenterons ensuite le modèle de Bates et Robert (1986). Il reprend l'idée des durées minimales des dépenses développée par De Serpa (1971) et applique la problématique du choix modal à ce modèle. Truong et Hensher (1985b) suggèrent un premier prolongement de ce modèle où la valeur du temps est fonction à la fois du temps de déplacement et de son prix. Nous proposons une autre extension dans laquelle la valeur du temps n'est plus fonction que du seul temps de déplacement. Le modèle

de Jara-Diaz (1994), quant à lui, reprend l'hypothèse de base de Evans (1972), selon laquelle seuls les temps passés dans les différentes activités sont pris en compte dans la fonction d'utilité. Il introduit également l'hypothèse d'exogénéité du travail. Nous terminerons ce chapitre par une analyse de la proposition de Causse (1999), celle-ci présente l'avantage de déterminer la liaison entre durée et valeur du temps à partir d'un cadre général, celui de Bates et Robert (1986).

## **1.1 La théorie de l'affectation optimale des ressources monétaires et temporelles**

### **1.1.1 Le temps comme ressource homogène : le modèle de Becker (1965)**

#### **1.1.1.1 Le modèle de base**

Dans le modèle classique du consommateur, on admet implicitement que l'acte de consommation est instantané. Or, consommer prend du temps : celui qui est consacré à l'acte de consommer en lui-même, mais également celui qui est nécessaire à la préparation de la décision d'achat et à sa réalisation. Les choix du consommateur ne sont donc pas seulement limités par une contrainte de revenu ; ils le sont également par une contrainte temporelle.

Dans l'approche moderne de la théorie de la demande, telle qu'elle est formulée par exemple par Becker (65), les consommations en biens et en temps ne sont jamais considérées comme des fins en elles-mêmes. Il s'agit de facteurs de production que les individus combinent en certaines proportions pour produire des biens finaux (en anglais, *commodities* par opposition à *goods*). Ces inputs interviennent dans leur relation de préférence. Cette approche, similaire à celle de Lancaster (1966), constitue donc un retour sur la distinction classique en économie entre les entreprises qui produisent et les ménages qui consomment. On considère désormais qu'un ménage peut produire un bien final tel que la santé en combinant certains inputs matériels, comme les consommations médicales, les consommations alimentaires, etc..., et certains inputs temporels, comme le temps passé chez le médecin ou à l'hôpital, le temps passé à se soigner soi-même, le temps passé à manger, etc..., de la même manière qu'un

entrepreneur produit de la fonte en combinant du fer, un service rendu par des hauts fourneaux et une force de travail.

Formellement, le comportement d'un individu (ou d'un ménage) est donc représenté comme un arbitrage entre un certain nombre de biens finaux repérés par des variables  $Z_1, \dots, Z_n$ , les quantités correspondantes étant liées aux quantités d'inputs matériels et temporels selon des relations formellement analogues à des fonctions de production<sup>4</sup>, appelées « technologies de consommation ». On admet donc l'existence d'une relation de préférences représentable par la fonction d'utilité :

$$U(Z_1, \dots, Z_i, \dots, Z_n)$$

que l'on cherche à maximiser sous les contraintes des technologies de consommation, qui, quand les ressources matérielles et temporelles sont au moins partiellement substituables, s'expriment sous la forme :

$$Z_i = Z_i(q_i, T_i)$$

où  $q_i$  est le vecteur des quantités d'inputs utilisées pour produire le bien final et  $T_i$  le temps consacré à sa production. On peut aussi être amené à considérer des technologies de consommation à facteurs complémentaires<sup>5</sup> avec, dans ce cas :

$$\begin{cases} T_i = a_i Z_i \\ q_i = b_i Z_i \end{cases}$$

$a_i$  et  $b_i$  étant des vecteurs,

Dans cette formulation, les ménages sont à la fois des unités de production et des « maximisateurs d'utilité ». En incorporant les technologies de consommation, on peut représenter les préférences par la fonction :

$$U(Z_1, \dots, Z_i, \dots, Z_n) \equiv U(Z_1(q_1, T_1), \dots, Z_i(q_i, T_i), \dots, Z_n(q_n, T_n)) \equiv U(q_1, \dots, q_i, \dots, q_n; T_1, \dots, T_i, \dots, T_n)$$

que l'on maximise sous les contraintes de revenu et de temps.

Afin de simplifier la présentation, supposons que les  $T_i$  et les  $q_i$  soient des scalaires (la généralisation à des vecteurs ne soulève pas de difficultés, mais alourdit simplement les

---

<sup>4</sup> Les biens finaux peuvent aller jusqu'à inclure le sommeil, dans la mesure où les agents peuvent faire des arbitrages entre le temps occupé à dormir et d'autres activités (Biddle et Hamermesh, 1990).

<sup>5</sup> La technologie de consommation n'étant à facteurs substituables que dans une certaine zone, et à facteurs complémentaires au-delà.

notations). En tenant compte d'une activité, le travail, qui ne consomme pas de biens mais produit un revenu proportionnel au temps  $T_w$  qui lui est consacré, l'approche de Becker (1965) conduit alors à formaliser le comportement du consommateur sous la forme d'un choix, celui du vecteur  $(q_1, \dots, q_i, \dots, q_n; T_1, \dots, T_i, \dots, T_n, T_w)$  solution du problème de maximisation sous contrainte suivant :

$$(I) \quad \begin{cases} \text{Max } U(q_1, \dots, q_i, \dots, q_n; T_1, \dots, T_i, \dots, T_n, T_w) \\ \text{sc} \\ \sum_i p_i q_i \leq w T_w + r \\ \sum_i T_i + T_w \leq T_0 \end{cases}$$

où  $w$  est le taux de salaire,  $r$  est le montant des ressources exogènes de l'agent et  $T_0$  est le temps disponible.

Lorsque Becker essaie, sur la base d'un tel modèle, de catégoriser les biens finaux, il rejette la distinction entre travail, loisir et activités intermédiaires. En effet, par définition, tous les  $Z_i$  sont des biens finaux et tous les  $T_i$  des inputs pour produire ces biens finaux : dans cette représentation le temps n'est pas une fin en soi.

Pour la détermination d'une combinaison optimale, le Lagrangien s'écrit :

$$L = U(q_1, \dots, q_n; T_1, \dots, T_n, T_w) + \lambda(w T_w + r - \sum_i p_i q_i) + \mu(T_0 - \sum_i T_i - T_w)$$

Les conditions du premier ordre pour un maximum sont :

$$\begin{aligned} \frac{\partial L}{\partial q_i} &= \frac{\partial U}{\partial q_i} - \lambda p_i = 0 \\ \frac{\partial L}{\partial T_i} &= \frac{\partial U}{\partial T_i} - \mu = 0 \\ \frac{\partial L}{\partial T_w} &= \frac{\partial U}{\partial T_w} + \lambda w - \mu = 0 \end{aligned}$$

On déduit aisément de ces conditions la valeur monétaire du temps, notée  $\theta$  :

$$\theta = \frac{\mu}{\lambda} = p_i \frac{\partial U / \partial T_i}{\partial U / \partial q_i} = w + p_i \frac{\partial U / \partial T_w}{\partial U / \partial q_i}$$

Si  $\frac{\partial U / \partial T_w}{\partial U / \partial q_i} = 0$ , c'est à dire en l'absence de substituabilité directe entre le temps de travail et

les ressources matérielles (ce qui était le cas du modèle original de Becker (1965)), la valeur du temps est égale aux taux de salaire. En revanche, dès que les préférences de l'agent prennent en compte directement le temps consacré au travail, au taux de salaire s'ajoute un terme que l'on peut interpréter comme la valeur subjective du travail (Johnson (1966) ; Gronau (1986)).

On peut également réécrire le Lagrangien sous la forme :

$$L = U(q_1, \dots, q_n; T_1, \dots, T_n, T_w) + \lambda[(wT_w + r - \sum_i p_i q_i) + \theta(T_0 - \sum_i T_i - T_w)]$$

ce qui conduit à l'expression suivante :

$$L = U(q_1, \dots, q_n; T_1, \dots, T_n, T_w) + \lambda[r + \theta T_0 - \sum_i p_i q_i - \theta \sum_i T_i - (\theta - w)T_w]$$

Le terme entre crochets est la fonction de coût généralisé. Le ménage réagit comme s'il optimisait par rapport à une contrainte unique.

$$\sum_i p_i q_i + \theta [T_w \sum_i T_i] \leq r + wT_w + \theta T_0$$

La valeur globale des coûts monétaires et des coût temporels doit être inférieure ou égale à la valeur globale des ressources matérielles et ressources temporelles, le prix de ces dernières étant égal à la valeur du temps.

### 1.1.1.2 Quelques développements ultérieurs

Des prolongements complètent le modèle de Becker (1965) sans en modifier fondamentalement la logique. Chez Becker, la valeur du temps est unique, valable quelle que soit l'activité, et quand cette dernière est du transport, elle ne dépend pas du mode de transport utilisé.

Un premier amendement consiste à tenir compte du fait qu'une même activité, par exemple le transport, peut concourir simultanément à la production de plusieurs biens finaux. Ainsi, un voyage ne remplit par forcément l'objectif de rejoindre une destination déterminée. Outre le fait que le temps qui y est consacré peut être utilisé à d'autres fins, il peut constituer en lui-même une source d'agrément ou de désagrément (Oort, 1969). De ce fait, « un troisième

terme apparaît, à savoir la valeur de la perception directe de l'utilité du temps de trajet. C'est une idée intuitivement attractive, une réduction exogène du temps de trajet n'ayant pas pour seul effet d'augmenter le temps de loisir ou le temps de travail, mais aussi de réduire le temps de trajet lui-même, ce qui peut rendre cette réduction encore plus attractive si le déplacement est déplaisant par lui-même » (Jara-Diaz, 2000). On peut également, à l'instar de Small (1982), intégrer le fait que toutes les périodes de la journée ne sont pas équivalentes, le taux marginal de substitution entre ressources temporelles et matérielles pouvant varier en fonction de la plage horaire.

Une modification plus importante, proposée par Jara-Diaz et alii (1988), consiste à considérer le fait que la durée de certaines activités, en particulier la durée du travail, ne peut être choisie librement. En restant dans un cadre simple où l'agent produit un seul type de bien final avec de la consommation et du loisir<sup>6</sup>, la fonction d'utilité s'écrit maintenant :

$$U(q, T_l)$$

où  $q$  est la consommation de bien et  $T_l$  est le temps de loisir. Sachant que l'agent doit se déplacer pour travailler (ou consommer), ses contraintes sont :

$$\begin{aligned} q + c &\leq r + wT_w \\ T_l + T_t &\leq T_0 - T_w \end{aligned}$$

où  $T_t$  et  $T_w$  sont respectivement les temps de transport et de travail, ce dernier étant fixe et rémunéré au taux  $w$  ;  $c$  est le coût du transport et le montant exogène des ressources,  $r$ , inclut maintenant les revenus du travail qui, du fait de la fixité de la durée du travail, sont exogènes. En incorporant les contraintes saturées dans la fonction d'utilité, celles-ci deviennent :

$$U(r + wT_w - c, T_0 - T_w - T_t)$$

Supposons temporairement que l'agent puisse choisir son temps de travail et qu'il dispose d'un choix entre des modes de transport suffisamment variés. La structure de la fonction d'utilité ci-dessus implique qu'à l'équilibre, on ait :

$$w = \theta = TMT$$

où  $\theta = \frac{\partial U / \partial T_l}{\partial U / \partial q}$  est le taux marginal de substitution entre consommation et loisir, qui correspond ici à la valeur du temps. Le terme  $TMT$  désigne le taux marginal de substitution

---

<sup>6</sup> On pourrait également noter que, comme chez Becker, le travail n'est pas source d'utilité. Cependant, comme le temps de travail n'est plus choisi, ce point n'a pas d'importance.

entre coût de transport ( $c$ ) et durée de déplacement ( $T_i$ ) induit par le choix des modes de transport disponibles. La première égalité est analogue à celle de Becker (1965). La seconde nous dit que l'agent égalise aussi la valeur du temps et son taux marginal de transformation.

Quand  $T_w$  est fixe et ne fait plus l'objet d'un choix de l'agent, la première égalité n'est plus vérifiée. En revanche, la seconde subsiste. En utilisant, comme Jara-Diaz et alii (1988), une fonction d'utilité de Cobb-Douglas, on obtient :

$$U = (T_0 - T_w - T_i)^\beta (r - wT_w - c)^{1-\beta}$$

d'où

$$\theta = \frac{\partial U / \partial T_i}{\partial U / \partial c_i} = \frac{\beta}{1-\beta} \frac{r - wT_w - c}{T_0 - T_w - T_i} = \frac{\beta}{1-\beta} \frac{q}{T_i}$$

Dans ce cas particulier, la valeur du temps est proportionnelle à la consommation par unité de temps. On ne peut manquer de faire le parallèle entre cette dernière et le taux de salaire, qui correspond au rythme d'acquisition des ressources par unité de temps.

## 1.1.2 Du temps comme ressource à la valeur d'une économie de temps

### 1.1.2.1 Le modèles de De Serpa (1971)

L'objectif de De Serpa (1971, voir également 1973) est de mettre en évidence la distinction entre activités intermédiaires, pour lesquels l'usage du temps est contraint, et activités de loisirs pour lesquelles il est choisi. Cette distinction est liée à l'introduction originale d'une contrainte « technologique » qui définit le temps minimum requis pour la consommation d'un panier de biens. La fonction d'utilité dépend alors du temps minimal nécessaire pour la consommation du bien  $i$  et de la quantité consommée de ce bien.

Le modèle qui formalise les choix  $\{q_1, \dots, q_i, \dots, q_n, T_1, \dots, T_i, \dots, T_n\}$  du consommateur peut alors s'écrire,



$$(II) \quad \begin{cases} \text{Max } U(q_1, \dots, q_i, \dots, q_n, T_1, \dots, T_i, \dots, T_n) \\ \text{sc} \\ \sum_i p_i q_i \leq r' \\ \sum_i T_i = T_0 \\ T_i \geq a_i q_i \quad i = 1, \dots, n \end{cases}$$

où  $r'$  est le revenu fixe et  $a_i$  est le temps nécessaire pour la consommation d'une quantité  $q_i$  de bien  $i$ . L'individu reçoit une dotation fixe de temps  $T_0$  sur la période de décision<sup>7</sup>. Son choix n'est cependant pas en général entièrement libre ; il est contraint par des données naturelles, techniques ou même institutionnelles. Ainsi, compte tenu de l'état de la route, du type de voiture dont on dispose, du trafic global, des limitations de vitesse, le temps mis pour aller en automobile d'un point à un autre ne pourra être inférieure à une certaine valeur  $a_i q_i$ .

En conséquence,  $a_i$  est le « coefficient technologique ou institutionnel qui détermine le temps minimum requis pour consommer une unité de  $q_i$  » (De Serpa, 1971). Si le consommateur doit choisir de consacrer un temps minimum pour la consommation du  $i^{\text{ème}}$  bien ( $T_i = a_i q_i$ ), De Serpa (1971) considère alors que ce bien est un bien intermédiaire. Si le consommateur décide d'allouer plus de temps qu'il n'en a de disponible pour le  $i^{\text{ème}}$  bien ( $T_i > a_i q_i$ ), alors la consommation de ce bien correspond à du loisir. Cette interprétation est naturelle. Si le temps consacré à une activité est source de désutilité ou n'est que faiblement générateur d'utilité, l'agent cherchera à le réduire au minimum, se heurtant à la contrainte de temps minimal. Le temps n'est utilisé que parce qu'il est indispensable à la consommation d'un bien matériel, ce qui correspond bien à l'idée de bien intermédiaire. A l'opposé, si l'agent ne sature pas la contrainte, c'est qu'il tire une utilité propre au temps consacré à cette activité : on retrouve bien ici la notion de loisir.

On notera  $\lambda$ ,  $\mu$  et  $k_i$  les multiplicateurs associés respectivement à la contrainte budgétaire classique, à la contrainte de budget-temps, et aux contraintes de consommation temporelle

<sup>7</sup> L'hypothèse d'une dotation fixe de temps et de revenu permet d'éviter la possibilité que l'individu puisse échanger du temps contre de l'argent par le biais du travail, ce qu'on peut justifier, comme avec Jara-Diaz, par le fait que la réglementation impose souvent le nombre d'heures travaillées, ne permettant donc pas à l'individu de choisir la valeur de  $T_w$ .  $T_0$  est alors la dotation de temps total net des heures de travail ( $T_0 = T - T_w$ ) et  $r'$  est la somme du revenu issu du travail et des revenus autres que celui issu du travail ( $r' = wT_w + r$ ). Cependant, le modèle peut être modifié en introduisant le travail, ou en définissant un des biens ( $q_w$ ) comme revenu du travail ( $p_w < 0$ ), ou  $p_w q_w$  augmente le revenu et  $T_w = a_w q_w$  réduit la temps disponible. Dans tous les cas les propriétés du modèle ne sont pas altérées.

minimale, que l'on introduit pour résoudre de manière classique ce problème de programmation linéaire.

Les conditions du première ordre sont :

$$\begin{aligned}\frac{\partial U}{\partial q_i} &= \lambda p_i + k_i a_i, \\ \frac{\partial U}{\partial T_i} &= \mu - k_i, \\ k_i(T_i - a_i q_i) &= 0\end{aligned}$$

pour  $i = 1, \dots, n$  avec la relation d'exclusion : si  $T_i > a_i q_i$ , alors  $k_i = 0$ .

De là, on déduit la relation suivante :

$$\frac{k_i}{\lambda} = \frac{\mu}{\lambda} - \frac{\partial U / \partial T_i}{\lambda}$$

qui exprime la valeur d'une économie de temps dans l'activité  $i$ ,  $\left(\frac{k_i}{\lambda}\right)$ , comme la différence entre la valeur du temps comme ressource, ou disposition à payer de l'agent pour voir sa contrainte de budget-temps relâchée d'une unité,  $\left(\frac{\mu}{\lambda}\right)$ , et la valeur du temps comme support de l'activité  $i$ , ou taux marginal de substitution entre le temps alloué à l'activité  $i$  et les ressources monétaires,  $\left(\frac{\partial U / \partial T_i}{\lambda}\right)$ .

La distinction entre trois notions :

- la valeur du temps comme ressource,
- la valeur du temps comme support de l'activité  $i$ ,
- la valeur d'une économie de temps dans l'activité  $i$ ,

est clairement mise en lumière. Ainsi, dans ce modèle, la valeur du temps est spécifique à chacune des activités  $i$ .

On notera que, si le  $i^{\text{ème}}$  bien est du loisir, la contrainte de temps n'est pas saturée et  $k_i$  est égal à zéro. Dans ce cas,

$$\frac{\mu}{\lambda} = \frac{\partial U / \partial T_i}{\lambda} = p_i \frac{\partial U / \partial T_i}{\partial U / \partial q_i}$$

ce qui signifie que la valeur du temps comme ressource est égale à la valeur du temps consacré à la consommation du bien  $i$ . On retrouve dans ce cas précis la valeur du temps du modèle de Becker (1965). Aucun gain marginal en bien-être ne peut être généré par le transfert du temps de la consommation du  $i^{\text{ème}}$  bien vers une autre alternative.

A l'opposé, si le  $i^{\text{ème}}$  bien est un bien intermédiaire, la contrainte de temps est saturée et  $k_i$  est strictement positif. Puisque  $\mu/\lambda$  est supérieur à  $\frac{\partial U/\partial T_i}{\lambda}$ , une réduction de  $a_i$  pourrait produire un gain en bien-être en raison de l'opportunité pour le consommateur de transférer du temps vers d'autres alternatives.

Le modèle de De Serpa (1971) permet d'apporter un éclairage intéressant sur l'interprétation des mesures des valeurs du temps issues des travaux d'économétrie appliquée sur les choix de mode de transport. Très souvent, lorsqu'on utilise l'expression valeur du temps dans ces travaux, on se réfère en réalité à la valeur de la contrainte. On peut lire par exemple que la valeur du temps d'un individu n'est pas unique, mais dépend de l'activité considérée. Or, par définition,  $\left(\frac{\mu}{\lambda}\right)$  est unique.  $k_i$  dépend quant à lui de l'activité  $i$  (voir l'expression de  $\partial U/\partial T_i$ ). De même, lorsqu'on observe le comportement d'un individu qui doit choisir entre plusieurs moyens de transport, dont certains se révèlent plus rapides et plus chers, et qu'on en déduit un taux marginal de substitution entre temps et revenu, ce n'est pas la valeur du temps  $\left(\frac{\mu}{\lambda}\right)$  que l'on révèle ainsi, mais bien la valeur d'une économie de temps pour l'activité de transport  $i$  considérée,  $\left(\frac{k_i}{\lambda}\right)$ .

### 1.1.2.2 La confrontation des modèles de Becker (1965) et de De Serpa (1971)

Truong et Hensher (1985) permettent de préciser la nature et la portée des différences entre le modèle de Becker (1965) et celui de De Serpa (1971). Ils démontrent que la première théorie nous conduit à un concept de « shadow price », ou coût d'opportunité du temps de voyage, uniforme dans toutes les activités et quelles que soient les circonstances. La seconde théorie, à

l'opposé, conduit à une utilité marginale du temps de voyage qui peut diverger du concept du « shadow price » uniforme.

Supposons que, au sein d'un ensemble d'alternatives possibles, un individu choisisse l'activité qui lui assure un niveau d'utilité maximum. On définit une fonction d'utilité indirecte pour le choix  $i$  :

$$v_i = v(\pi_{i1}, \dots, \pi_{in})$$

où les  $\pi_{ij}$ ,  $j=1, \dots, n$ , sont les prix implicites des  $n$  attributs qui caractérisent chacune des alternatives.

Dans le cas de Becker (1965), la fonction d'utilité indirecte  $v_i$  peut être considérée comme le résultat du problème de maximisation du consommateur suivant :

$$(III) \begin{cases} \max U(q_i, L_i) \\ q_i + c_i \leq r \\ L_i + T_i \leq T_0 \end{cases}$$

où  $U$  est sa fonction d'utilité,  $q_i$  et  $L_i$  sont les quantités respectives de biens et le temps de loisir restant après avoir déduit le coût de déplacement  $c_i$  et le temps de déplacement  $T_i$  prélevés respectivement sur les ressources monétaires,  $r$ , et sur les ressources temporelles,  $T_0$ .

On obtient le Lagrangien associé à ce problème :

$$L = U(q_i, L_i) + \lambda(r - c_i - q_i) + \mu(T_0 - T_i - L_i)$$

Les conditions du premier ordre pour un maximum sont :

$$\begin{aligned} \partial U / \partial q_i &= \lambda \\ \partial U / \partial L_i &= \mu \end{aligned}$$

De là, on déduit la valeur monétaire du temps :

$$\pi_i = \frac{\partial U / \partial L_i}{\partial U / \partial q_i} \Big|_{u=\max} = \frac{\mu}{\lambda}$$

On peut réécrire l'utilité du mode  $i$  en faisant une approximation par un développement de Taylor à l'ordre 1 :

$$v_i = \alpha_i + (\partial U / \partial q_i) q_i + (\partial U / \partial L_i) L_i$$

Après substitution des conditions du premier ordre puis des contraintes budgétaires et temporelles, la fonction d'utilité indirecte peut à son tour être approximée de la façon suivante :

$$v_i = \alpha_i + \lambda(r - c_i) + \mu(T_0 - T_i)$$

Si l'agent utilise plusieurs modes de transport, sachant que cette utilisation simultanée n'est possible que si les différents modes procurent le même niveau d'utilité maximal, on peut simplifier l'expression en regroupant les termes constants qui n'influencent pas la maximisation pour obtenir

$$v_i = \beta_i - \lambda c_i - \mu T_i$$

et on en déduit la valeur du temps :  $VTD_i = \frac{\partial v_i / \partial T_i}{\partial v_i / \partial C_i} = \frac{\mu}{\lambda}$

Elle est égale au « shadow price » de ce dernier ( $\mu/\lambda$ ), et donc ne varie pas d'un mode de transport à l'autre.

Dans le modèle De Serpa (1971), on ajoute une contrainte technologique au problème d'optimisation du consommateur (III) :

$$T_i \geq a_i c_i$$

où  $a_i$  peut être une quantité de temps minimum institutionnel ou technologique requis pour consommer une unité de  $C_i$ .

De plus, Truong et Hensher (1985a) notent que, dans le modèle de De Serpa (1971), la désutilité du temps de travail ne peut pas être égale à l'utilité du temps de loisir, comme le suppose la fonction d'utilité de Becker (1965). Pour que la contrainte soit active, il faut une désutilité spécifique au transport, et la fonction d'utilité doit être modifiée :

$$U' = U'(q_i, L_i, T_i)$$

Le choix mode de transport peut alors être définie par :

$$(IV) \begin{cases} \max & U'(q_i, L_i, T_i) \\ \text{sc} & q_i \leq r - c_i \\ & L_i \leq T_0 - T_i \\ & a_i C_i \leq T_i \end{cases}$$

Le Lagrangien associé à ce problème est :

$$L' = U'(q_i, L_i, T_i) + \lambda(r - c_i - q_i) + \mu(T_0 - T_i - L_i) + k_i(T_i - a_i c_i)$$

Les contraintes du premier ordre deviennent maintenant :

$$\begin{aligned}\partial U'/\partial q_i &= \lambda \\ \partial U'/\partial L_i &= \mu \\ \partial U'/\partial T_i &= \mu - k_i\end{aligned}$$

Dans le cas de De Serpa (1971), la fonction d'utilité dépend de  $q_i$ ,  $L_i$  et  $T_i$ , et l'approximation linéaire du premier ordre s'écrit :

$$v_i = \alpha_i + (\partial U'/\partial q_i)q_i + (\partial U'/\partial L_i)L_i + (\partial U'/\partial T_i)T_i$$

Après substitution des conditions du premier ordre puis des contraintes budgétaires et temporelles, on obtient :

$$v_i = \alpha_i + \lambda(r - c_i) + \mu(T_0 - T_i) + (\mu - k_i)T_i$$

et après avoir regroupé les termes invariants

$$v_i = \beta_i - \lambda c_i - k_i T_i$$

Cette expression fait largement appel aux formes en termes de coût généralisé. De plus, on peut maintenant utiliser sans équivoque le théorème de l'enveloppe pour définir la valeur économique du temps associée au mode  $i$  comme le rapport des coefficients du temps et du prix :

$$VTD_i = \frac{\partial v_i / \partial T_i}{\partial v_i / \partial c_i} = \frac{k_i}{\lambda}$$

Ainsi, dans ce modèle, la valeur du temps mesurée est différente d'un mode de transport à l'autre ( $k_i/\lambda$ ). C'est pourquoi la fonction d'utilité indirecte à la De Serpa (1971) nous paraît meilleure que celle de Becker (1965).

### 1.1.2.3 Le modèle d'Evans (1972)

En 1972, Evans propose un modèle qui présente deux nouvelles spécificités. En premier lieu, la fonction d'utilité ne contient qu'un seul type d'arguments, le temps alloué pour différentes alternatives. Le temps consacré à une activité devient une source d'utilité. Cette notation n'exclut pas la consommation de biens. Mais celle-ci devient, au moins partiellement,

complémentaire de l'usage du temps. On retrouve alors une liaison entre coût et temps qui, dans le contexte du transport, est similaire aux contraintes de De Serpa (1971).

En second lieu, Evans (1972) introduit des contraintes reliant les durées consacrées à différentes activités. Le temps passé dans une activité, par exemple dans le transport, peut dépendre du temps passé dans une autre activité, par exemple les loisirs. Ainsi, sachant que la durée d'une séance de cinéma est à peu près fixe, plus un agent consacre du temps au cinéma, plus il s'y rend fréquemment, plus ses déplacements sont nombreux et plus la durée totale de ces déplacements est importante. On retrouve une liaison similaire entre déplacements domicile-travail et durée du travail quand la réduction de celle-ci passe par une diminution du nombre de jours ouvrés plutôt que par une réduction de la durée journalière.

Examinons d'abord ce qui se passe en l'absence de liaison entre durées passées dans différentes activités. Le consommateur choisit sa combinaison d'activités sous les contraintes de temps et de ressources monétaires. La fonction d'utilité s'écrit de la manière suivante :

$$U(T_1, \dots, T_i, \dots, T_I)$$

où  $T_i$  est le nombre d'unités de temps que l'individu consacre à l'activité  $i$ . Les contraintes sont les suivantes :

$$\begin{aligned} \sum_i r_i T_i &= 0 \\ T_0 &= \sum_i T_i \end{aligned}$$

où  $r_i$  est le coût horaire de l'activité  $i$ , positif si l'individu paye pour pratiquer cette activité, négatif s'il est rémunéré (dans ce cas, il s'agit d'heures de travail), nul si l'activité est gratuite (mais, dans ce cas, elle sera en général source de désutilité, au moins à la marge). La première de ces deux contraintes, la contrainte de ressources, traduit bien l'idée présentée plus haut qu'une complémentarité entre consommations matérielles et temporelles existe.

En désignant par  $\lambda$  et  $\mu$  les multiplicateurs de Lagrange de chacune des deux contraintes, les conditions du premier ordre pour un maximum sont :

$$\frac{\partial U}{\partial T_i} = \mu + \lambda r_i \quad (i = 1, 2, \dots, n)$$

De ce fait, le temps passé dans chaque activité dépend de l'utilité ou de la désutilité que cette activité lui procure, et du prix que l'individu perçoit ou paye pour celle-ci. Quand l'individu alloue de manière optimale son temps parmi différentes activités, une petite augmentation de temps passé dans une activité accompagnée d'une baisse équivalente de temps dans une autre activité indiffère l'individu.

Le taux marginal de substitution entre la  $j^{\text{ème}}$  et la  $i^{\text{ème}}$  activité étant :

$$TMS_{ji} = \frac{\partial U / \partial T_i}{\partial U / \partial T_j},$$

les conditions du premier ordre impliquent que :

$$\frac{\partial U / \partial T_i}{\partial U / \partial T_j} = \frac{\mu + \lambda r_i}{\mu + \lambda r_j} = TMS_{ji} \Leftrightarrow \frac{r_i}{r_j} = \frac{\partial U / \partial T_i - \mu}{\partial U / \partial T_j - \mu}$$

On constate qu'à l'équilibre, le ratio entre coûts horaires n'égale plus le taux marginal de substitution. Le premier ne permet donc pas de mesurer directement le second. Ce résultat est la conséquence de la complémentarité entre consommations temporelles et matérielles. De ce fait, le temps apparaît simultanément dans les deux contraintes (2) et (3), alors que, dans le modèle de Becker (1965), on avait deux contraintes séparées, une pour les ressources matérielles et une pour les ressources temporelles. Seul le travail apparaissait dans les deux.

Introduisons maintenant les contraintes reliant les durées consacrées à différentes activités, et cela, en reprenant l'exemple du transport et du cinéma. Soient  $T_t$  la durée totale des déplacements pour aller et revenir du cinéma et  $T_c$  la durée totale de cette activité. La représentation la plus simple de la contrainte qui en résulte est l'inégalité suivante :

$$T_t \geq bT_c$$

où  $b$  est une constante inférieure à 1. Nous postulons donc que l'individu peut passer plus de temps dans les transports que  $bT_c$ , mais pas moins. En ajoutant cette contrainte au problème, et en explicitant également le rôle du temps de travail, on aboutit au modèle suivant :

$$\max U(T_w, T_t, T_c; T_1, \dots, T_I)$$

sous les contraintes suivantes,



$$r_w T_w + r_t T_t + r_c T_c + \sum_i r_i T_i = 0$$

$$T_w + T_t + T_c + \sum_i T_i = T_0$$

$$bT_c - T_t \leq 0$$

où  $T_w$ ,  $T_t$ ,  $T_c$ ,  $T_i$  sont respectivement les temps passés au travail, dans les transports, au cinéma et dans les autres activités. La première contrainte est la contrainte de budget, avec  $r_w \leq 0$  et  $r_t$ ,  $r_c \geq 0$ . En désignant, comme précédemment, par  $\lambda$ ,  $\mu$  et  $k$  les multiplicateurs respectifs de chacune de ces trois contraintes, les conditions de premier ordre pour un maximum sont maintenant :

$$\frac{\partial U}{\partial T_w} = \mu + \lambda r_w$$

$$\frac{\partial U}{\partial T_t} = \mu + \lambda r_t - k$$

$$\frac{\partial U}{\partial T_c} = \mu + \lambda r_c + bk$$

$$\frac{\partial U}{\partial T_i} = \mu + \lambda r_i$$

Si la troisième contrainte est saturée, la valeur monétaire d'un petit relâchement de la contrainte associée au temps de transport est donnée par  $(k/\lambda)$ . Nous l'obtenons en combinant les contraintes du premier ordre :

$$\frac{k}{\lambda} = r_t - \frac{U_t - \mu}{U_w - \mu} r_w = r_t + (-r_w) + \frac{U_w}{\lambda} - \frac{U_t}{\lambda}$$

Rappelons que le travail ayant un coût salarial  $r_w$  négatif,  $-r_w$  correspondant à un gain. La valeur du temps est donc égale à la somme du coût du déplacement, du gain salarial, et de la différence entre la valeur de l'utilité marginale du travail  $(U_w/\lambda)$  et la valeur de l'utilité marginale du déplacement  $(U_t/\lambda)$ .

Si au contraire la contrainte n'est pas saturée ( $k=0$ ), l'individu passe plus de temps qu'il n'est nécessaire dans les déplacements et on retrouve la condition d'équilibre (6)

$$\frac{r_t}{r_w} = \frac{U_t - \mu}{U_w - \mu}$$

Dans ce cas, l'individu sera indifférent à une faible variation de temps de déplacement, ce qui n'était pas vrai lorsque la contrainte (9) était saturée.

### **1.1.3 L'apport de la théorie de la productivité marginale : Hensher (1995).**

La valorisation du temps de transport durant le travail est demeurée jusqu'à présent ignorée dans notre analyse. On peut l'expliquer par le relatif consensus qui entoure la pratique courante de la valorisation au coût salarial, rarement remise en question.

Si l'on adopte le cadre normatif de l'économie du bien-être, on fera appel à l'analyse du comportement du producteur. Traditionnellement, la théorie de la productivité marginale établit que l'entreprise emploie de la main d'œuvre tant que le coût marginal d'une embauche supplémentaire n'excède pas la productivité marginale de ce travailleur supplémentaire. Dans ces conditions, les économies de temps de transport durant le travail sont estimées au taux de salaire complet (coût du travail de l'employeur), qui englobe à la fois le salaire brut et les cotisations patronales.

La valorisation des économies de temps de transport pendant une activité professionnelle, si on utilise le travail comme numéraire, ne se justifie en fait pleinement que lorsque certaines conditions sont vérifiées :

- la pénibilité du trajet est identique à celle du travail courant,
- les déplacements sont intégralement entrepris pendant les horaires administratifs de travail,
- les éventuels gains de temps sont réaffectés à du travail courant.

Dans ces conditions, on distingue les économies de temps réalisées par les personnes voyageant pour affaires et celles dont le transport est le métier, i.e. les routiers, les chauffeur de taxi... Pour les seconds, s'il y a une reconversion effective des économies de transport supplémentaires, la valorisation au taux salarial s'applique encore ; pour les premiers, elle n'est pas forcément de mise.

Hensher (1995) aborde cette question d'une manière renouvelée, en abandonnant le caractère simpliste du modèle de base au profit d'une approche enrichie. L'interprétation révisée de la théorie de la productivité marginale proposée dès 1977 et plusieurs fois améliorée depuis, débouche sur une expression étoffée de la valeur des économies de temps durant le travail.

Celle-ci incorpore dorénavant des considérations propres à la productivité, aux différentiels d'utilité travail/ transport et travail/loisir, ainsi qu'à la taxation. Elle prend la forme suivante (Hensher, 1995) :

$$VTTS_{travail} = (1 - r - pq)MP + \frac{1-r}{1-t}VW + \frac{r}{1-t}VL + MPF$$

où :

- $r$  représente la proportion de temps de transport économisé converti en loisir ;
- $p$  représente la proportion de temps de transport consacré au travail courant ;
- $q$  désigne la productivité relative du travail réalisé en voyageant par rapport au travail courant ;
- $MP$  correspond à la productivité du travail ;
- $VL$  désigne la valeur pour l'employé du temps de loisir relativement au temps de transport ; c'est la valeur comportementale traditionnellement dérivée des modèles d'affectation individuelle des ressources monétaires et temporelles ;
- $VW$  représente la valeur pour l'employé du temps de travail courant relativement au temps de travail réalisé pendant le trajet ;
- $MPF$  recouvre la valeur du produit marginal supplémentaire imputable à une fatigue réduite, conséquence directe de la diminution des trajets ;
- $t$  désigne le taux d'imposition de l'employé. La division par  $(1-t)$  assure une homogénéité dans les calculs : les accroissements de l'utilité pour le travailleur ne sont donc pas soumis à l'impôt contrairement aux autres termes de la formule. Dans les premières versions de la théorie révisée de la productivité, cette indexation n'existait pas. En revanche, la dernière version en date traite de manière exhaustive et cohérente l'imposition directe du point de vue de l'employeur et de l'employé.

Les intérêts de cette formulation sont les suivants :

- une partie des trajets d'affaire ou commerciaux sont réalisés en dehors des horaires administratifs de travail. Le temps consacré à ce type de transport est donc un temps mixte, i.e. qui emprunte à la fois au loisir et au travail ;
- l'utilisation productive du temps de trajet est possible ;
- on prend en compte le différentiel d'utilité pour l'employé entre le temps dépensé en trajet et celui dépensé en « travail courant ».

### 1.1.4 Une prise en compte intégrée transport-activités : le modèle de O'Dea (1994)

O'Dea (1994) propose, en conservant le formalisme de De Serpa (1971), de prolonger le modèle de base afin de prendre explicitement en compte le lien entre activité finale conduite à destination et transport. Dans ce modèle, le consommateur doit déterminer comment allouer son temps et son revenu entre  $k$  activités finales de loisir et de travail, chacune de ces activités entraînant des consommations intermédiaires en transport. Nous définissons  $n_i$  comme le nombre de fois où le consommateur choisit de s'engager dans la  $i^{\text{ème}}$  activité. En suivant les hypothèses de De Serpa (1971), nous définissons un temps de transport minimum  $a_i$  pour chaque activité :

$$tt_i \geq a_i \quad i = 1, \dots, k, W$$

où  $W$  est l'indice correspondant à l'activité travail.

Soient  $q_i$  le nombre d'unités de bien consommées pendant chaque séquence de la  $i^{\text{ème}}$  activité et  $t_i$  le temps nécessaire pour cette activité<sup>8</sup>. Si le prix unitaire du bien est  $p_i$ , la dépense totale sur la  $i^{\text{ème}}$  activité pendant la période de décision sera de  $n_i q_i p_i$ .

Le programme de maximisation correspondant s'écrit :

$$\max U(n_1, \dots, n_k, n_W, t_1, \dots, t_k, t_W, q_1, \dots, q_k, q_W, TT_1, \dots, TT_k, TT_W)$$

sous les contraintes

$$\sum_{i=1}^k n_i (t_i + tt_i) + n_W (t_W + tt_W) \leq T_0$$

$$\sum_{i=1}^k n_i q_i p_i + n_W q_W p_W \leq w t_w n_w$$

$$tt_i \geq a_i, \quad i = 1, \dots, k, W$$

Dans la fonction d'utilité,  $TT_i (= n_i tt_i)$  est le temps total consacré pour la  $i^{\text{ème}}$  activité pendant une période. En introduisant le temps de déplacement dans la fonction d'utilité, nous admettons que le consommateur peut obtenir une utilité ou une désutilité pour se déplacer. Dans la contrainte de budget,  $w$  est le taux de salaire unitaire. En conséquence, nous supposons que l'unique source de revenu du consommateur est le travail.

<sup>8</sup> Selon DeSerpa,  $x_i$  et  $t_i$  sont indépendants. L'individu est libre d'affecter plus de temps à une activité qu'il n'en faut.

La solution standard de ce problème est obtenue en maximisant le Lagrangien :

$$L = U(n_1, \dots, n_k, n_w, t_1, \dots, t_k, t_w, q_1, \dots, q_k, q_w, TT_1, \dots, TT_k, TT_w) + \lambda(wt_w n_w - \sum_{i=1}^k n_i q_i p_i - n_w q_w p_w) \\ + \mu(T_0 - \sum_{i=1}^k n_i(t_i + tt_i) - n_w(t_w + tt_w)) + \sum_{i=1}^k \alpha_i(tt_i - a_i) + \alpha_w(tt_w - a_w)$$

Les conditions du premier ordre sont :

$$\frac{\partial L}{\partial n_i} = \frac{\partial U}{\partial n_i} + \frac{\partial U}{\partial TT_i} tt_i - \lambda q_i p_i - \mu(t_i + tt_i) = 0 \quad i = 1, \dots, k$$

$$\frac{\partial L}{\partial n_w} = \frac{\partial U}{\partial n_w} + \frac{\partial U}{\partial TT_w} tt_w + \lambda(wt_w - q_w p_w) - \mu(t_w + tt_w) = 0$$

$$\frac{\partial L}{\partial t_i} = \frac{\partial U}{\partial t_i} - \mu n_i = 0 \quad i = 1, \dots, k$$

$$\frac{\partial L}{\partial t_w} = \frac{\partial U}{\partial t_w} + \lambda w n_w - \mu n_w = 0$$

$$\frac{\partial L}{\partial q_i} = \frac{\partial U}{\partial q_i} - \lambda n_i p_i = 0 \quad i = 1, \dots, k$$

$$\frac{\partial L}{\partial q_w} = \frac{\partial U}{\partial q_w} - \lambda n_w p_w = 0$$

$$\frac{\partial L}{\partial tt_i} = \frac{\partial U}{\partial TT_i} n_i - \mu n_i + \alpha_i = 0 \quad i = 1, \dots, k$$

$$\frac{\partial L}{\partial tt_w} = \frac{\partial U}{\partial TT_w} n_w - \mu n_w + \alpha_w = 0$$

$$\frac{\partial L}{\partial \lambda} = wt_w n_w - \sum_{i=1}^k n_i q_i p_i - n_w q_w p_w$$

$$\frac{\partial L}{\partial \mu} = T - \sum_{i=1}^k n_i(t_i + tt_i) - n_w(t_w + tt_w)$$

$$\alpha_i(tt_i - a_i) = 0, \quad i = 1, \dots, k, W$$

On en déduit la valeur du temps :

$$\frac{\mu}{\lambda} = w \left[ \frac{n_w \frac{\partial U}{\partial t_i}}{n_w \frac{\partial U}{\partial t_i} - n_i \frac{\partial U}{\partial t_w}} \right]$$

Comme précédemment, si l'utilité marginale du temps alloué pour le travail est nulle ( $\partial U / \partial t_w = 0 \Rightarrow \mu / \lambda = w$ ), la valeur du temps sera égale au taux de salaire.

Pour déterminer la valeur d'une réduction du temps de déplacement associé à la  $i^{\text{ème}}$  activité, nous pouvons commencer par analyser les conséquences d'une réduction de temps de voyage, la contrainte de temps minimum étant saturée. Dans ce cas,

$$\alpha_i = \mu n_i - \frac{\partial U}{\partial TT_i} n_i$$

Puisque  $\alpha_i$  représente l'utilité marginale d'un changement de  $a_i$ , nous pouvons obtenir une expression de la disposition à payer du consommateur pour une réduction de  $a_i$  en divisant l'équation précédente par  $\lambda$ .

$$\frac{\alpha_i}{\lambda} = \frac{\mu}{\lambda} n_i - \frac{\partial U}{\partial TT_i} \frac{n_i}{\lambda} = n_i \left( \frac{\mu}{\lambda} - \frac{1}{\lambda} \frac{\partial U}{\partial TT_i} \right)$$

Puisque le nombre de déplacements associés à la  $i^{\text{ème}}$  activité est égal à  $n_i$ , on peut déterminer la valeur d'une économie de temps par trajet en divisant l'équation précédente par  $n_i$  :

$$\frac{\alpha_i}{\lambda} \frac{1}{n_i} = \frac{\mu}{\lambda} - \frac{1}{\lambda} \frac{\partial U}{\partial TT_i}$$

On retrouve bien le fait que la valeur d'une économie du temps de déplacement unitaire sera égale au taux de salaire si l'utilité marginale du temps de travail et l'utilité marginale du temps de déplacement de la  $i^{\text{ème}}$  activité sont toutes les deux nulles. Par ailleurs, en tenant compte du fait que  $TT_i = n_i tt_i$ , avec un léger abus de notation, on peut écrire :

$$\frac{\alpha_i}{\lambda} = \frac{\mu}{\lambda} n_i - \frac{1}{\lambda} \frac{\partial U}{\partial tt_i}$$

Cette équation conforte l'intuition selon laquelle une diminution unitaire de  $a_i$  est d'autant plus valorisée par l'usager que la fréquence de l'engagement dans l'activité finale associée est élevée.

O'Dea (1994) compare ensuite ses conclusions à celles du modèle de De Serpa (1971). A l'évidence, seule la présence de  $n_i$  différencie leurs résultats. En d'autres termes, il est possible de faire émerger des conclusions comparables (au terme  $n_i$  près) à celles fournies par De Serpa (1971) à partir d'un cadre analytique dans lequel le lien entre transport et volonté de s'engager dans une activité spécifique à destination est explicite.

Comment transcrire empiriquement ce nouveau résultat ? L'alternative suivante résume les deux voies susceptibles d'être suivies : dériver le modèle empirique du programme général de O'Dea (1994), mais on est alors rapidement dépassé par le nombre de contraintes et de variables impliquées ; ou bien continuer à raisonner sur la base du programme de De Serpa (1971) tout en segmentant le modèle empirique pour tenir compte du motif et de la périodicité du déplacement. Nous retiendrons la seconde option, plus opérationnelle.

## 1.2 Les applications du modèle général à l'analyse du choix modal

Pour passer des modèles de détermination du temps de transport aux modèles de choix modal, il faut comparer les modes de transport sur la base de leurs coûts monétaires et des durées de déplacement qui leur sont associées. On calcule alors une utilité associée au choix de chacun des modes, l'usager choisissant le mode pour lequel cette utilité est maximale.

### 1.2.1 Le modèle de Train et McFadden (1978)

Proposé en 1978, le modèle de Train et McFadden a été l'un des premiers à dériver explicitement le choix modal domicile-travail d'un programme néoclassique d'arbitrage entre biens de consommation,  $q$ , et temps de loisir,  $L$ , sous contraintes budgétaire et temporelle. A partir de fonctions d'utilité directe prédéfinies, ils dérivent les fonctions d'utilité indirecte conditionnelles au choix modal, en cherchant à établir l'existence de règles strictes d'incorporation de leurs arguments. Le modèle s'écrit de la manière suivante :

$$\text{Max } U(q, L)$$

sous les contraintes suivantes si l'agent choisit le mode de transport  $i$ ,  $i = 1, \dots, m$  :

$$q + c_i = wT_w + r$$

$$T_w + L + T_i = T$$

- où
- $w$  représente le taux de salaire ;
  - $T_w$  est le nombre d'heures de travail sur la période de référence, de durée  $T$  ;
  - $r$  est le montant des ressources non salariales, supposées exogènes ;
  - $c_i, T_i$ , sont le coût et le temps de transport pour le mode  $i$ ,  $i = 1, \dots, m$ .

Le nombre d'heures travaillées,  $T_w$ , joue un rôle essentiel dans l'analyse, puisque la consommation de biens,  $q$ , et le temps de loisir,  $L$ , en dépendent au travers des contraintes. L'utilité peut ainsi s'exprimer directement en fonction de la seule variable  $T_w$ , laquelle se trouve sous le contrôle exclusif de l'usager. Le programme global de maximisation de l'agent procède en deux étapes. Une première phase s'emploie à déterminer, pour chaque mode de



transport  $i$ , la valeur optimale  $T_w^*(c_i, T_i)$ , résultat de la maximisation de  $U$  par rapport à  $T_w$ . Réinjectée dans  $U$ , cette valeur permet d'obtenir l'expression de la fonction d'utilité indirecte conditionnelle à  $i$ ,

$$\tilde{V}_i(c_i, T_i) \equiv U(wT_w^*(c_i, T_i) + r - c_i, T - T_i - T_w^*(c_i, T_i))$$

Le choix modal, objet de la deuxième étape, se porte alors sur l'alternative  $i$  pour laquelle  $V_i$  est maximale, d'où l'utilité du meilleur choix :

$$\tilde{V}(c_1, T_1, \dots, c_I, T_I) = \max_i \tilde{V}_i(c_i, T_i)$$

La comparaison formelle des  $V_i$  peut se limiter aux termes dépendant des seuls modes de transport. Ce sont eux qui déterminent l'utilité relative  $V_i - V_j$  d'un mode de transport par rapport à l'autre.

Cet article fait date car il initie une réflexion de fond. Il établit la cohérence économique interne des modèles de choix discrets dérivés de la théorie de l'utilité représentative au profit de formes dans lesquelles, à la fois le choix et le procédé d'intégration des variables explicatives découlent d'une dérivation logique d'un revenu endogène, à la base de la modélisation précédente.

### 1.2.2 Le modèle de Bates et Roberts (1986)

Pour analyser le choix entre les différents modes de transport, nous suivrons plutôt Bates et Roberts (1986) qui, en reprenant chez De Serpa (1971) l'idée des durées minimales de déplacement, réécrivent le programme néoclassique standard de la manière suivante :

$$(V) \quad \left\{ \begin{array}{l} \text{Max } U(x, t_0, t_1, t_2, \dots, t_m) \\ \text{sc} \\ px + \sum_{i=1}^m \delta_i p_i = R \\ t_0 + \sum_{i=1}^m \delta_i t_i = T \\ t_i \geq \bar{t}_i \quad i = 1, \dots, m \end{array} \right.$$

où  $x$  représente un bien de consommation composite couvrant toutes les consommations hors transport,  $p$  son prix,  $t_0$  le temps de consommation associé à  $x$  et où  $(t_1, \dots, t_m)$  et  $(p_1, \dots, p_m)$  sont respectivement les vecteurs de temps et de prix associés aux  $m$  modes de transport mis à la disposition de l'utilisateur. Le vecteur  $(\delta_1, \dots, \delta_m)$  regroupe des variables indicatrices du choix modal, construites de la manière suivante :  $\delta_i = 1$  si le mode  $i$  est choisi,  $\delta_i = 0$  sinon.

Le Lagrangien associé à ce programme s'écrit alors :

$$L = U(x, t_0, t_1, \dots, t_m) + \lambda(R - px - \sum_{i=1}^m \delta_i p_i) + \mu(T - t_0 - \sum_{i=1}^m \delta_i t_i) + \sum_{i=1}^m \delta_i k_i (t_i - \bar{t}_i)$$

Avec des contraintes de consommation temporelle minimale saturées, les conditions nécessaires du premier ordre s'écrivent :

$$\frac{\partial U}{\partial x} = \lambda p, \quad \lambda > 0$$

$$\frac{\partial U}{\partial t_0} = \mu, \quad \mu > 0$$

et, pour tout  $i$  tel que  $\delta_i = 1$ , c'est à dire pour tout mode de transport effectivement utilisé par l'agent,

$$\frac{\partial U}{\partial t_i} = \mu \delta_i - \delta_i k_i, \quad k_i \geq 0$$

Ce cadre d'analyse a servi de support aux auteurs précités pour dériver une forme analytique linéaire de l'utilité représentative. Il nous paraît utile de présenter de manière détaillée leur démarche afin de mettre l'accent sur les hypothèses implicites utilisées. La formulation alternative que nous suggérons ensuite nous permet alors, d'une part, de ramener leurs résultats à un cas particulier d'un problème plus global, d'autre part de le généraliser en proposant une forme polynomiale du second degré.

La littérature ci-dessus mentionnée propose une procédure d'approximation de la fonction d'utilité indirecte selon la démarche suivante. Dans un premier temps, on approxime au premier ordre la fonction d'utilité directe par :

$$U \approx a + \frac{\partial U}{\partial x}x + \frac{\partial U}{\partial t_0}t_0 + \sum_{i=1}^m \delta_i \frac{\partial U}{\partial t_i}t_i$$

Après substitution des conditions du premier ordre et des contraintes budgétaires, la fonction d'utilité indirecte peut, à son tour, être approximée de la façon suivante :

$$\bar{V} \approx \bar{a} + \lambda(R - \sum_{i=1}^m \delta_i p_i) + \mu T - \sum_{i=1}^m \delta_i k_i t_i$$

On peut alors, pour chaque mode de transport, définir une fonction d'utilité indirecte conditionnelle, égale à l'utilité indirecte quand ce mode de transport est choisi, c'est à dire quand  $\delta_i = 1$ . Elle s'écrit sous la forme :

$$\bar{V}_i = a_i + \lambda(R - p_i) + \mu T - k_i t_i \quad i = 1, \dots, m$$

Les termes en  $\lambda, R, \mu$  et  $T$  sont ensuite présentés comme étant indépendants de l'alternative considérée<sup>9</sup>. Ils sont alors écartés de l'expression de  $\bar{V}_i$  car ils sont sans influence dans la comparaison entre deux modes de transport. Il reste :

$$\bar{V}_i = [\lambda R + \mu T] + V_i, \text{ avec } V_i = a_i - \lambda p_i - k_i t_i$$

L'opportunité de ce résultat est incontestable puisqu'il justifie totalement la pratique courante, qui fait largement appel aux formes en termes de coût généralisé. De plus, on peut maintenant sans équivoque possible définir la valeur d'une économie de temps pour les déplacements par le mode  $i$  comme le rapport des coefficients du temps et du prix :

$$VTTS_i = \frac{k_i}{\lambda} = \frac{\partial V_i / \partial t_i}{\partial V_i / \partial p_i}$$

Cependant, la forme analytique proposée est linéaire et débouche sur une formulation en termes d'utilité marginale constante qui s'oppose à la fois à la règle économique de l'utilité marginale décroissante et au « bon sens » qui veut qu'une heure économisée sur un trajet de deux heures n'a pas la même valeur qu'une heure économisée sur un trajet de quinze heures

---

<sup>9</sup> Nous reviendrons plus loin sur cette hypothèse qui nous paraît pour le moins restrictive.

ou encore, qu'une heure économisée n'a pas la même valeur qu'une heure perdue (au signe près).

### 1.2.3 Une généralisation

Il semble plus réaliste de supposer que la valeur du temps est spécifique à chaque segment de marché. En reprenant une suggestion de Truong et Hensher (1985b), on peut envisager une extension où la valeur du temps est fonction du temps de déplacement et du prix.

Nous nous basons sur le fait que, le coût  $p_i$  et la durée minimale,  $t_i$ , pour le mode  $i$  étant des paramètres du problème de maximisation de l'utilité, les valeurs optimales des multiplicateurs de Lagrange, en particulier les  $k_i$  de l'équation,  $V_i = a_i - \lambda p_i - k_i t_i$  sont fonction de  $p_i$  et de  $t_i$  :

$$k_i = k(t_i, p_i)$$

En faisant une approximation linéaire de Taylor au premier ordre au voisinage du point moyen de coordonnées  $\bar{t}$  et  $\bar{p}$  pour chacune des alternatives  $i$ , nous obtenons l'expression suivante :

$$k_i = \bar{k} + (\partial k / \partial t)_i (t_i - \bar{t}) + (\partial k / \partial p)_i (p_i - \bar{p})$$

En combinant les deux expressions précédentes, nous obtenons :

$$V_i = a_i - \lambda p_i - \bar{k} t_i + (\beta t_i^2 + \gamma p_i t_i + \omega)$$

où  $\beta = (\partial k / \partial t)_i$ ,  $\gamma = (\partial k / \partial p)_i$  et  $\omega = -\beta \bar{t} - \gamma \bar{p}$

On en dérive l'expression suivante de la valeur du temps :

$$VTTS_i = \frac{\partial V_i / \partial t_i}{\partial V_i / \partial p_i} \bigg|_{V=V_i} = \frac{-\bar{k} + \gamma p_i + 2\beta t_i}{-\lambda + \gamma t_i}$$

Nous voyons maintenant que la valeur du temps est bien dépendante du temps de déplacement  $t_i$  et du coût  $p_i$ .

Dans ce cadre d'analyse, nous proposons de ne plus relier l'utilité marginale associée à la contrainte de temps au prix du transport mais uniquement désormais au temps de transport.

Le paramètre théorique  $k_i$  de l'équation ne dépend plus de  $p_i$ , mais uniquement de  $t_i$  :  $k_i = k'(t_i)$ . En reprenant la démarche de Truong et Hensher exposée précédemment, nous obtenons la fonction d'utilité conditionnelle au mode  $i$ ,

$$V_i = a_i - \lambda p_i - \bar{k} t_i + \beta' t_i^2 + \omega'$$

où  $\beta' = (\partial k' / \partial t)_i$  et  $\omega' = -\beta \bar{t}$ ,

ce qui donne pour la valeur du temps :

$$VTTS_i = \frac{\partial V_i / \partial t_i}{\partial V_i / \partial p_i} \bigg|_{V=V_i} = \frac{-\bar{k} + 2\beta' t_i}{-\lambda}$$

Nous avons donc le choix entre deux valeurs du temps, l'une dépendant à la fois du coût et du temps de déplacement et l'autre ne dépendant que du temps de déplacement. D'un point de vue théorique, on ne peut départager les deux propositions. Nous ferons notre choix sur la base de tests économétriques.

#### 1.2.4 Détection d'un effet revenu dans le choix modal

En 1989, Jara-Diaz et Videla proposent un modèle pour détecter l'existence d'un effet revenu. Dans ce modèle la fonction d'utilité indirecte à la forme suivante :

$$V(P, I - c_j, Q_j) = V_1(P, I - c_j) + V_2(Q_j)$$

où  $P$  = est le prix du bien,

$I$  = le revenu,

$c_j$  = le coût de transport du mode  $j$ ,

$Q_j$  = les autres caractéristiques du voyage.

Nous avons besoin de  $V_i$  pour analyser l'effet du revenu, pour cela nous devons faire une approximation linéaire au voisinage de  $(P, I)$  à un ordre supérieur à 1, ceci permet au revenu d'apparaître en tant que variable explicative du choix modal :

$$V_1(P, I - c_i) = V_1(P, I) + \sum_{i=1}^n 1/i! V_1^i(P, I) (-c_j)^i + R_{n+1}$$

où  $V_1^i$  est la  $i^{\text{ème}}$  dérivé de  $V_1$  évalué en  $I$ .

Le choix du mode de transport dépend du revenu si l'ordre d'approximation est supérieur ou égal à 2.

L'utilité marginale du revenu est donnée par

$$\lambda = \frac{\partial V_1}{\partial I} = V_1^1(P, I) + \sum_{i=1}^{n-1} 1/i! V_1^{i+1}(P, I) (-c_j)^i$$

et on peut remarquer que dans le cas linéaire ( $n=1$ ),  $\lambda$  est indépendant du revenu.

Jara-Diaz et Videla proposent un test très simple qui consiste à introduire un nouveau terme, le coût de transport au carré, dans la fonction d'utilité linéaire. Il suffit ensuite d'étudier si le coefficient associé à ce nouveau terme est significatif ou non. La fonction d'utilité indirecte que nous allons utiliser aura la forme suivante :

$$V_i = \alpha_0 + \alpha_c c_i + \frac{1}{2} \alpha_c^2 c_i^2 + V_2(Q_i)$$

Si le coefficient estimé de la variable coût de transport au carré est significatif pour différentes tranches de revenus, alors il existe une fonction d'utilité de la forme  $V_i(c_i, t_i, I)$ . La valeur du temps dans ce cas aura la forme suivante :

$$VT_i = \frac{\partial V_i / \partial t_i}{\partial V_i / \partial c_i} = \frac{\alpha_t}{\alpha_c + \alpha_c^2 c_i}$$

où  $\alpha_t$  représente le coefficient du temps de la fonction d'utilité indirecte,  $\alpha_c$  est le coefficient du coût et  $\alpha_c^2$  est le coefficient du coût au carré. On notera, que la valeur du temps dépend du coût de l'alternative choisi. Ceci une conséquence directe de l'utilisation d'une approximation du second ordre de la fonction d'utilité indirecte.

### 1.2.5 Une théorie unifiée du déplacement et des activités

Jara-Diaz (1994) reprend l'hypothèse de base de Evans (1972), selon laquelle seuls les temps passés dans les différentes activités sont pris en compte dans la fonction d'utilité. Il suppose que les biens sont à la fois nécessaires pour réaliser les différentes activités mais qu'ils sont la principale source de dépense. Le temps consacré à chaque activité détermine, d'une part, les temps et les coûts de transport pour chacun des modes et, d'autre part, les consommations de biens.

En tenant compte de ces considérations, Jara-Diaz (1994) formule le modèle suivant :

$$\begin{aligned}
 & \underset{T, W_v(m), B}{\text{Max}} \quad U(T, W_F, W_v, t) \\
 \text{Sc} \quad & \sum_i T_i + W_v + W_F + \sum_{j=1}^B \sum_{i \in M_j} \delta_{ij} t_{ij} = T^0 \\
 & F(X, T) \geq 0 \\
 & \sum_i \sum_d P_{id} X_{id} + \sum_{j=1}^B \sum_{i \in M_j} \delta_{ij} C_{ij} = I_F + w W_v
 \end{aligned}$$

où  $T$  = vecteur de temps  $T_i$  des différentes activités sur une période de durée  $T^0$ ,  
 $W_F$  = partie fixe de la durée du travail,  
 $W_v$  = partie variable de la durée du travail,  
 $t$  = vecteur de temps de transport  $t_{ij}$  durant la période  $T^0$ ,  
 $B$  = nombre de voyages pendant la période,  
 $\delta_{ij}$  = variable indicatrice égale à 1 si le mode  $i$  du voyage  $j$  est choisi, 0 sinon,  
 $F$  = fonction de transformation entre les biens et le temps,  
 $X_{id}$  = quantité de bien  $i$  acheté dans la zone  $d$ ,  
 $p_{id}$  = prix du bien  $i$  dans la zone  $d$ ,  
 $M_j$  = ensemble des modes disponibles pour le voyage  $j$ ,  
 $I_F$  = revenu fixe (y compris les revenus salariaux sur la plage fixe),  
 $w$  = taux de salaire.

Dans ce modèle, toutes les activités ont un impact sur l'utilité de l'individu. De plus, les biens peuvent être achetés en différents endroits, avec de probables différences de prix. Si le

domicile et le lieu du travail sont connus, le nombre de voyages est seulement sensible aux choix de  $X$  (quatrième contrainte du programme précédent).

Les variables exogènes sont  $W_F$ ,  $I_F$ ,  $t_{ij}$ ,  $c_{ij}$ ,  $T^0$ ,  $p_{id}$  et  $w$ , tandis que les variables de décision deviennent  $T_i$ ,  $\delta_{ij}$ ,  $X_{id}$ ,  $W_V$  et  $B$ . La solution du modèle de génération est  $B$ , la solution du modèle de distribution est le vecteur  $X$ , et la solution du modèle de choix modal est  $\delta$ .

On constate que  $\sum T_i = L$  et  $\sum p_{id} X_{id} = G$ . La relation entre les biens et les activités implique une liaison entre  $G$  et  $L$ . La consommation de biens requiert donc du temps de loisir ( $L$ ) et réciproquement. Cette hypothèse est ignorée de Becker (1965) et de Train et McFadden (1978).

Pour analyser plus précisément ce modèle, Jara-Diaz (1994) examine le problème de choix modal dans le cas d'un voyage  $k$ , en supposant que les autres décisions du voyageur sont fixées (i.e. le nombre de voyages et la destination). Dans ce cas, le modèle s'écrit de la manière suivante :

$$\text{Max}_{T, W_V, i \in M_k} U(T, W_F, W_V, t_1, \dots, t_{ik}, \dots, t_B)$$

$$\text{sous les contraintes } \sum_i T_i + W_V + W_F + \sum_{j \neq k} t_j + t_{ik} = T^0$$

$$F(X, T) \geq 0$$

$$\sum_i p_i X_i + \sum_{j \neq k} c_j + c_{ik} = I_F + w W_V$$

On ignore la relation entre  $B$  et  $X$  pour simplifier le modèle : la quantité de biens n'affecte pas le nombre de voyages.

La fonction d'utilité indirecte est obtenue à partir des valeurs  $T^*$ ,  $X^*$  et  $W_V^*$ , solutions du programme précédent.

$$U(T^*, W_F, W_V^*, t_{ik}, \mathbf{t}) \equiv \tilde{V}(T^0 - W_F - \bar{t} - t_{ik}, W_F, t_{ik}, \mathbf{t}, \frac{1}{w}(I_F - \bar{c} - c_{ik})) \quad (1)$$

où  $\mathbf{t}$  est le vecteur des temps de déplacements dont on a oté la composante  $t_{ik}$ . Dans cette spécification, le temps de transport revêt un double rôle : il affecte le niveau d'utilité et le temps disponible pour les autres activités (il s'agit de la conséquence de la première contrainte du précédent programme).



Cette utilité indirecte conditionnelle peut s'interpréter en termes d'arbitrage entre « biens et loisirs ». Le premier argument est le temps total disponible que l'on peut consacrer au loisir ou au travail. Le dernier argument est le temps nécessaire pour acheter la combinaison de biens  $X$ , soit  $G/w$  moins le temps de travail supplémentaire. Formellement,

$$\tilde{V}_i = \tilde{V}(L + W_v, W_F, t_{ik}, t, \frac{G}{w} - W_v)$$

qui montre explicitement la différence avec l'approche usuelle en terme d'arbitrage biens-loisirs.

Nous réalisons ci-après une approximation linéaire de  $V$ . Cette approximation ne nous permet plus de distinguer le double rôle du temps de transport. L'approximation au premier ordre de l'utilité indirecte conditionnelle du mode  $i$  est :

$$\tilde{V}_i = k + \alpha(T^0 - W_F - \bar{t} - t_{ik}) + \beta W_F + \gamma t_{ik} + \sum \theta_h t_h + \lambda \frac{1}{w} (I_F - \bar{c} - c_{ik})$$

où  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  et  $\lambda$  sont les coefficients à estimer. Nous ne conservons que les termes qui influencent le choix modal, soit

$$V_i = (\gamma - \alpha)t_{ik} - \lambda \frac{c_{ik}}{w}$$

Cette équation ne nous permet pas d'estimer les coefficients  $\gamma$  et  $\alpha$  séparément. De plus, il faut noter qu'ici, seuls le temps et le coût des déplacements sont pertinents dans le processus de choix modal. Or, d'autres variables peuvent être prises en compte dans ce processus (par exemple le revenu). Ceci ne se produirait pas si nous avions réalisé une approximation de la fonction d'utilité indirecte à l'ordre deux, comme le montrent Jara-Diaz et Videla (1989).

La valeur du temps qui en découle s'écrit :

$$VT = \frac{\partial V_i / \partial t_{ik}}{\partial V_i / \partial c_{ik}} = \frac{(\gamma - \alpha)}{\lambda/w}$$

Dans ce cadre théorique,  $w$  représente le coût d'opportunité de l'accomplissement d'une activité en dehors des horaires de travail. Si un individu dispose d'un salaire fixe et d'un temps de travail fixe, il peut demander des arrangements de travail. Le taux de salaire pour un travail supplémentaire doit être établi, cette valeur rentre dans l'utilité du mode de transport

### 1.2.6 La proposition de Causse (1999)

Causse (1999) a proposé une démarche alternative qui, tout conservant le support du programme (V), permet une dérivation générale de la forme analytique générale des  $V_i$  et la construction d'expressions de la valeur du temps intégrant l'impact sur cette dernière du temps de déplacement.

Soit  $V(R, T, p, p_1, \dots, p_m, \bar{t}_1, \dots, \bar{t}_m)$  la fonction d'utilité indirecte associée à la réalisation du programme (V). Ses arguments sont les variables exogènes du programme. Ils sont désignés par la suite par le vecteur  $a = (R, T, p, p_1, \dots, p_m, \bar{t}_1, \dots, \bar{t}_m)$ .  $V(a)$  est donc solution du problème paramétré qui suit :

$$(VI) \quad \begin{cases} V(a) = \underset{x, t_0, t_1, \dots, t_m}{\text{Max}} U(x, t_0, t_1, \dots, t_m) \\ \text{s.c.} \begin{cases} h_1(x, t_0, t_1, \dots, t_m, a) = 0 \\ h_2(x, t_0, t_1, \dots, t_m, a) = 0 \\ h_{3i}(x, t_0, t_1, \dots, t_m, a) = 0 \quad i = 1, \dots, m \end{cases} \end{cases}$$

où

- $h_1$  désigne la contrainte de budget :  $px + \sum_{i=1}^m \delta_i p_i = R$
- $h_2$  désigne la contrainte de temps :  $t_0 + \sum_{i=1}^m \delta_i t_i = T$
- $h_{3i}$  désigne la contrainte de consommation temporelle minimale associée au mode  $i$  :  
 $t_i \geq \bar{t}_i, i = 1, \dots, m$

Le Lagrangien s'écrit alors :

$$L = U(x, t_0, t_1, \dots, t_m) + \lambda(a) h_1(x, t_0, t_1, \dots, t_m, a) + \mu(a) h_2(x, t_0, t_1, \dots, t_m, a) + \sum_{i=1}^m \delta_i k_i(a) h_{3i}(x, t_0, t_1, \dots, t_m, a)$$

D'après le théorème de l'enveloppe, il vient :

$$\frac{\partial V(a)}{\partial R} = \lambda(a)$$

$$\frac{\partial V(a)}{\partial T} = \mu(a)$$

$$\frac{\partial V(a)}{\partial p} = -\lambda(a)x(a)$$

$$\frac{\partial V(a)}{\partial p_i} = -\delta_i \lambda(a)$$

$$\frac{\partial V(a)}{\partial \bar{t}_i} = -\delta_i k_i(a)$$

Pour les différentielles totales de  $V$  et  $V_i$  il vient :

$$dV = \frac{\partial V(a)}{\partial R} dR + \frac{\partial V(a)}{\partial T} dT + \frac{\partial V(a)}{\partial p} dp + \sum_{i=1}^m \delta_i \frac{\partial V(a)}{\partial p_i} dp_i + \sum_{i=1}^m \delta_i \frac{\partial V(a)}{\partial \bar{t}_i} d\bar{t}_i$$

et

$$dV_i = \frac{\partial V(a)}{\partial R} dR + \frac{\partial V(a)}{\partial T} dT + \frac{\partial V(a)}{\partial p} dp + \frac{\partial V(a)}{\partial p_i} dp_i + \frac{\partial V(a)}{\partial \bar{t}_i} d\bar{t}_i$$

Par la suite, nous postulons systématiquement la fixité des dotations temporelles ( $T = \bar{T}$ ) et des prix hors transport ( $p = \bar{p}$ ). La différentielle totale de  $V_i$  se ramène à :

$$dV_i = \frac{\partial V(a)}{\partial R} dR + \frac{\partial V(a)}{\partial p_i} dp_i + \frac{\partial V(a)}{\partial \bar{t}_i} d\bar{t}_i$$

On recherche à présent la forme analytique de  $V_i$  à partir de sa différentielle totale et des hypothèses faites sur les dérivées partielles.

### **1<sup>er</sup> cas : Utilités marginales constantes**

Retenons l'hypothèse de constance des utilités marginales implicitement acceptée dans la plupart des modèles de demande en économie des transports. Il s'ensuit :

$$\frac{\partial V(a)}{\partial R} = \lambda \quad , \quad \frac{\partial V(a)}{\partial p_i} = -\delta_i \lambda \quad , \quad \frac{\partial V(a)}{\partial \bar{t}_i} = -\delta_i k_i$$

et en conséquence

$$dV_i = \lambda dR - \lambda dp_i - k_i d\bar{t}_i$$

où  $\lambda$  et  $k_i$  sont des constantes.

Le terme  $\lambda dR$  est indépendant du mode  $i$ . On peut donc le négliger car il n'intervient pas dans les comparaisons intermodales. Il reste :

$$dV_i = -\lambda dp_i - k_i d\bar{t}_i$$

En utilisant les propriétés des dérivées partielles, on obtient :

$$\frac{\partial V_i}{\partial p_i} = -\lambda \text{ et } \frac{\partial V_i}{\partial \bar{t}_i} = -k_i$$

Finalement, on aboutit à :

$$V_i = cste - \lambda p_i - k_i \bar{t}_i$$

Cette dérivation alternative du coût généralisé a pour principal mérite d'explicitier clairement les hypothèses sous-jacentes à son élaboration.

## **2<sup>ème</sup> cas : Relâchement de l'hypothèse de constance des utilités marginales**

Lorsque l'on relâche l'hypothèse de constance des utilités marginales, se pose alors la question de la spécification d'une forme analytique satisfaisante pour les utilités marginales. Afin de préserver le caractère universel de la présentation, Causse (1999) propose un développement limité à l'ordre 1 au voisinage du point moyen  $(\bar{R}, \bar{p}_i, \bar{\bar{t}}_i)$ . Notons dès à présent que la dérivation proposée est un cas polaire pour lequel un relâchement de l'hypothèse de constance a été opéré pour toutes les utilités marginales via toutes les variables. On peut imaginer des cas intermédiaires où certaines dérivées partielles restent constantes et/ou certaines variables sont fixes. Dans la situation la plus générale, on a :

$$\begin{aligned} \frac{\partial V(a)}{\partial R} = \lambda(a) &\approx \alpha + \left. \frac{\partial \lambda}{\partial R} \right|_{R=\bar{R}} (R - \bar{R}) + \left. \frac{\partial \lambda}{\partial p_i} \right|_{p_i=\bar{p}_i} (p_i - \bar{p}_i) + \left. \frac{\partial \lambda}{\partial \bar{t}_i} \right|_{\bar{t}_i=\bar{\bar{t}}_i} (\bar{t}_i - \bar{\bar{t}}_i) \\ &\approx \tilde{\alpha} + \beta R - \beta p_i + \gamma \bar{t}_i \end{aligned}$$

$$\frac{\partial V(a)}{\partial p_i} = -\delta_i \lambda(a) = \delta_i (-\tilde{\alpha} - \beta R + \beta p_i - \gamma \bar{t}_i)$$

$$\begin{aligned}\frac{\partial V(a)}{\partial \bar{t}_i} &= -\delta_i k_i(a) \approx -\delta_i \left( \delta + \frac{\partial k_i}{\partial R} \Big|_{R=\bar{R}} (R - \bar{R}) + \frac{\partial k_i}{\partial p_i} \Big|_{p_i=\bar{p}_i} (p_i - \bar{p}_i) + \frac{\partial k_i}{\partial \bar{t}_i} \Big|_{\bar{t}_i=\bar{\bar{t}}_i} (\bar{t}_i - \bar{\bar{t}}_i) \right) \\ &\approx \delta_i (\tilde{\delta} + \gamma R - \gamma p_i - \xi \bar{t}_i)\end{aligned}$$

$$\text{où} \quad \tilde{\alpha} = \alpha - \beta \bar{R} + \beta \bar{p}_i - \gamma \bar{\bar{t}}_i, \quad \beta = \frac{\partial \lambda}{\partial R} \Big|_{R=\bar{R}} = -\frac{\partial \lambda}{\partial p_i} \Big|_{p_i=\bar{p}_i}$$

$$\gamma = \frac{\partial \lambda}{\partial \bar{t}_i} \Big|_{\bar{t}_i=\bar{\bar{t}}_i} = -\frac{\partial k_i}{\partial R} \Big|_{R=\bar{R}} = \frac{\partial k_i}{\partial p_i} \Big|_{p_i=\bar{p}_i} = \frac{\partial^2 V}{\partial R \partial \bar{t}_i} \Big|_{\substack{R=\bar{R} \\ \bar{t}_i=\bar{\bar{t}}_i}}$$

$$\tilde{\delta} = -\delta - \gamma \bar{R} + \gamma \bar{p}_i + \xi \bar{\bar{t}}_i \quad \xi = \frac{\partial k_i}{\partial \bar{t}_i} \Big|_{\bar{t}_i=\bar{\bar{t}}_i} = -\frac{\partial^2 V}{\partial \bar{t}_i^2} \Big|_{\bar{t}_i=\bar{\bar{t}}_i}$$

Cette spécification des dérivées partielles conduit à une nouvelle forme pour la différentielle totale de  $V_i$  à partir de laquelle il devient possible de retrouver l'expression de l'utilité représentative. Il suit :

$$V_i \approx cste - \tilde{\alpha} p_i + \frac{1}{2} \beta p_i^2 + \tilde{\delta} \bar{t}_i - \frac{1}{2} \xi \bar{t}_i^2 - \gamma p_i \bar{t}_i - \beta R p_i + \gamma R \bar{t}_i + \tilde{\alpha} R + \frac{1}{2} \beta R^2$$

Les termes en  $R$  et  $R^2$  sont indépendants de l'alternative considérée et n'interviennent donc pas dans les comparaisons modales. En conséquence, on peut les intégrer dans la constante de l'expression de  $V_i$ , d'où :

$$V_i \approx cste - \tilde{\alpha} p_i + \frac{1}{2} \beta p_i^2 + \tilde{\delta} \bar{t}_i - \frac{1}{2} \xi \bar{t}_i^2 - \gamma p_i \bar{t}_i - \beta R p_i + \gamma R \bar{t}_i$$

Cette forme polynomiale préserve les fondements théoriques du programme allocatif (IV) et dépasse les critiques relatives à la constance des utilités marginales et à l'unicité des valeurs du temps de transport, adressées au modèle en terme de coût généralisé. Des fonctions de valeurs du temps peuvent dorénavant en être dérivées via le calcul suivant :

$$VTTS_i = \frac{\partial V_i / \partial \bar{t}_i}{\partial V_i / \partial p_i} = \frac{\tilde{\delta} - \xi \bar{t}_i - \gamma p_i + \gamma R}{-\tilde{\alpha} + \beta p_i - \gamma \bar{t}_i - \beta R}$$

Bien évidemment, ce modèle à caractère plus général reste un modèle de choix individuel. Dès lors que l'on cherche à l'appliquer à une population, il est vraisemblable que les coefficients des variables clés vont varier parmi les individus en fonction d'un certain nombre

d'éléments (le motif, la fréquence,...). Une segmentation appropriée doit permettre d'appréhender correctement une part de cette hétérogénéité. Deux alternatives s'offrent au modélisateur. La plus simple consiste en l'estimation de modèles spécifiques pour chaque segment dégagé. Cependant, en réduisant considérablement la taille de l'échantillon, ce procédé conduit souvent à des estimations peu significatives des effets des variables. La deuxième procède au moyen de variables indicatrices directement appliquées aux coefficients des variables. La supériorité de cette approche réside dans le fait qu'elle autorise des segmentations différenciées selon les variables sans réduction injustifiée de la taille de l'échantillon.

Enfin, la question relative à la spécificité ou au caractère générique des coefficients doit être abordée. La réponse théorique apportée par le modèle consiste en l'adoption de coefficients spécifiques pour les variables temporelles et de coefficients génériques pour les variables monétaires et les interactions.

### **1.3 Conclusion**

Les constats théoriques mis en évidence dans ce chapitre sur la fonction de la valeur du temps, montrent qu'il existe deux familles de modèle : ceux qui portent sur les déplacements domicile-travail, et ceux qui découlent du modèle de De Serpa.

Les modèles proposés par Train et McFadden (1978) et par Jara-Diaz (1994), s'intéressent à une problématique de choix modale sur les déplacements domicile-travail. Ces modèles conduisent à des valeurs du temps exprimée en fonction du taux de salaire. Pour autant, la portée des résultats avancés reste grandement entachée par toute une série de critique. Elles concernent en vrac : le caractère prédéfini de la fonction d'utilité directe, la non prise en compte, à l'exception du travail, les difficultés pratiques et théoriques rencontrées dans les essais de définition du loisir, le flou interprétatif au sujet du sens exact des valeurs du temps dérivées de ce cadre d'analyse. Ces modèles s'appliquent plus généralement dans le cadre de déplacement urbain.

Bates et Robert (1986) reprennent l'idée des durées minimales des dépenses développée par De Serpa (1971) et appliquent la problématique du choix modal à ce modèle. La fonction

d'utilité indirecte qu'ils obtiennent à le grand avantage d'être opérationnel sur le plan économétrique. De plus, cette fonction permet de différencier la valeur du temps selon le mode de transport, contrairement à Becker (1965). En outre, si nous relâchons les contraintes sur l'utilité marginale du temps, Truong et Hensher (1985b) montrent que la valeur du temps est fonction à la fois du temps de déplacement et de son prix. Causse (1999) propose une dérivation générale de la forme analytique de la fonction d'utilité indirecte et aboutit à une fonction de la valeur du temps qui dépend en plus du temps de déplacement et de son prix, du revenu de l'individu.

Nous privilégierons les modèles qui découlent de l'analyse de De Serpa. En effet, ceux-ci répondent très bien à des problématique de déplacement interurbain et offre une possibilité d'étude complète sur la nature de la fonction de la valeur du temps.

# **CHAPITRE 2**

## **LES TECHNIQUES D'ESTIMATION**

### **ECONOMETRIQUES : USAGE DES CHOIX DISCRETS**

#### **POUR L'ANALYSE DU CHOIX MODAL**

Les modèles de choix discrets sont utilisés pour analyser les situations dans lesquelles un individu doit faire un choix parmi un ensemble fini exhaustif de modalités mutuellement exclusives. Ces modèles calculent la probabilité qu'un individu sélectionne une modalité particulière parmi cet ensemble, étant donné les observations. De ce fait, ils répondent parfaitement à la problématique du choix modal.

Deux grandes classes de modèles sont généralement utilisées. Dans la première, dite classe à valeurs extrêmes généralisées (GEV), les probabilités de choix ont une forme explicite ne comportant pas d'intégrales. Le membre le plus utilisé de cette classe est le logit polytomique (MNL) qui doit sa grande popularité au fait que son utilisation n'exige que des calculs simples. Cette simplicité présente toutefois un inconvénient majeur : une perte de généralité due à des hypothèses restrictives qui imposent l'interdépendance entre les modalités. Cette interdépendance conduit en effet au problème bien connu sous le nom de « bus bleu, bus rouge » : l'agrégation de deux alternatives fortement corrélées entre elles ne conduit pas à la même probabilité globale que la somme des probabilités des composantes.

Un autre membre de la classe GEV, le logit emboîté (NMNL), admet quant à lui certaines formes d'interdépendances. Toutefois, les formes admises peuvent être trop restrictives. Dans les modèles à choix discrets, le fait d'ignorer ou de mal spécifier la structure d'interdépendance entre les modalités conduit à un problème d'estimation non convergente



des paramètres. L'utilisation du MNL ou du NMNL peut donc être non pertinente dans des applications où des modalités risquent d'être fortement interdépendantes et où la structure de décision qui est sous-jacente au NMNL est mal connue. En outre, si l'on désire utiliser un modèle de choix à des fins de prévision, il sera important de déterminer la structure d'erreurs qui donne le meilleur ajustement aux données, plutôt que de supposer faussement une structure particulière.

Dans la seconde classe, on retrouve le modèle probit polytomique (MNP). Ce dernier donne un degré considérable de flexibilité concernant la prise en considération des interdépendances entre les modalités. Dans le MNP, on suppose que ces interdépendances viennent de la structure de corrélation entre les erreurs spécifiques aux modalités. Pour plusieurs applications des modèles de choix polytomique, la possibilité d'admettre des modalités interdépendantes est une nécessité. Une source supplémentaire d'interdépendance entre les modalités peut aussi provenir du phénomène d'hétérogénéité entre individus. La principale difficulté liée à l'utilisation du modèle MNP vient du calcul des probabilités de choix qui sont exprimées sous forme d'intégrales multidimensionnelles. Elle rend, de manière générale, l'estimation très délicate.

Dans le cadre de la théorie des choix discrets, on peut aussi considérer d'autres formes d'extensions qui portent plutôt sur la forme de la fonction d'utilité. Pour introduire des formes fonctionnelles flexibles autres que les formes usuelles, linéaire et logarithmique, différentes transformations peuvent être appliquées aux variables indépendantes. La plus usuelle est la transformation de Box-Cox. Une autre solution est l'utilisation de coefficients aléatoires dans la fonction utilité. Elle porte sur des variables prédéfinies (temps). On aura alors un modèle logit à coefficients aléatoires.

Ce chapitre se décompose en quatre parties :

- La première portera sur la modélisation du choix discret appliquée au choix modal. On y présentera les différents modèles économétriques qui sont utilisés dans la théorie des choix discrets, ainsi que les extensions qui portent sur la forme de la fonction d'utilité.
- La deuxième présente les techniques d'estimation de ces modèles.
- La troisième s'intéresse à la validation de ces modèles par les tests économétriques.
- Et enfin, la dernière s'articule autour des méthodes d'interprétation des paramètres qui découlent des modèles de choix.

## 2.1 Modélisation désagrégée du choix modal

### 2.1.1 Le modèle de choix discrets

#### 2.1.1.1 Le modèle général

Les fondements théoriques des modèles désagrégés qui permettent d'analyser le comportement des voyageurs ont pour point de départ l'approche développée par Lancaster en 1966. Dans ce cadre d'analyse, les consommateurs tirent leur utilité des caractéristiques ou des attributs du mode de transport. On peut ainsi décrire au mieux la réalité de la décision de choix modal des voyageurs, saisir les caractéristiques pertinentes associées aux différents modes de transport et mieux comprendre la concurrence intermodale.

Nous ne présentons pas les bases des modèles ; elles sont présentés dans des ouvrages de référence (Hensher et Jonshon (1981), Ben-Akiva et Lerman (1985), Wrigley (1985), Ortuzar et willumsen (1994)). Les derniers développements sont présentés dans des articles récents (De Palma et Thisse (1989), McFadden (1991), Louvière (1992), Carson et alii (1994), Hensher (1994), Van de Vyvere (1994)).

Considérons une population de  $N$  voyageurs indicés chacun par  $n$ ,  $n=1, \dots, N$ , confrontés chacun à un ensemble  $C_n$  d'alternatives ou de modes de transport  $i = 1, \dots, J_n$ . Chaque individu  $n$  est doté d'une fonction d'utilité  $U_{i,n}$  définie pour chacune des alternatives  $i = 1, \dots, J_n$ . Cependant, l'économetre ne peut pas observer toutes les caractéristiques des variables qui influencent le choix de l'individu. De plus, il ne connaît pas de manière parfaite la fonction d'utilité représentant ses préférences,  $U_{i,n}$ .

On décompose alors  $U_{in}$  en deux parties :

1. une composante déterministe  $V_{in}$  définie sur les caractéristiques observables des modalités de transport et sur les facteurs socio-économiques observables des individus,
2. une composante aléatoire  $\varepsilon_{in}$  traduisant le manque d'information de l'économetre (variables affectant les choix partiellement connus, erreurs de mesures,...).

La fonction de satisfaction de l'individu  $n$  associée au mode de transport  $i$  s'écrit alors de la manière suivante :

$$(1) \quad U_{in} = V_{in} + \varepsilon_{in} \quad \text{pour } i=1, \dots, J_n.$$

On suppose que la composante déterministe  $V_{in}$  peut être convenablement décrite par une fonction linéaire des variables explicatives :

$$(1a) \quad U_{in} = X_{in}\beta + \varepsilon_{in} \quad \text{pour } i=1, \dots, J_n.$$

où  $X_{in}$  est un vecteur des variables explicatives de dimension  $(1,K)$  représentant les caractéristiques des voyageurs et du service de transport ;  $\beta$  est un vecteur de paramètres à estimer de dimension  $(K,1)$ .

En se basant sur la théorie de l'utilité, l'individu  $n$  choisira, parmi les  $J_n$  modes de transport à sa disposition, celui qui lui procure l'utilité la plus élevée. Dans cette optique, le modèle de choix discret est décrit par une variable  $y_{in}$  qui indique le choix observé  $i$ ,  $i=1, \dots, J_n$ , et par les variables latentes  $U_{in}$  qui gouvernent ce choix :

$$(1b) \quad y_{in} = \begin{cases} 1 & \text{si } U_{in} \geq U_{jn} \text{ pour } j=1, \dots, J_n \\ 0 & \text{sinon, et} \end{cases}$$

$$U_{in} = V_{in} + \varepsilon_{in}$$

Si l'individu  $n$  choisit le mode de transport  $i$ , la probabilité  $P_n(i)$  d'observer ce choix est définie de la manière suivante :

$$(2) \quad P_n(i) = P(U_{in} = \max_{j \in C_n} U_{jn}) = P(U_{in} \geq U_{jn} \text{ pour } j=1, \dots, J_n)$$

$$= P(\varepsilon_{jn} - \varepsilon_{in} \leq V_{in} - V_{jn} \text{ pour } j=1, \dots, J_n)$$

En faisant des hypothèses sur la distribution de probabilité conjointe des termes d'erreur  $\varepsilon_{in}$ ,  $i=1,\dots,J$ , on peut en dériver tous les modèles de choix multinomial usuels. De façon générale, la probabilité  $P_n(i)$  définie en (2) est égale à :

$$(3) \quad P_n(i) = \int_{D_{in}} f(\varepsilon_{1n}, \dots, \varepsilon_{Jn}) d\varepsilon_{1n} \dots d\varepsilon_{Jn}$$

où  $D_{in} = \{(\varepsilon_{1n}, \dots, \varepsilon_{Jn}) \mid \forall j \neq i, \varepsilon_{jn} - \varepsilon_{in} \leq V_{in} - V_{jn}\}$

et  $f(\varepsilon_{1n}, \dots, \varepsilon_{Jn})$  désigne la fonction de densité des termes aléatoires.

Pour l'analyse des choix désagrégés, les modèles les plus souvent utilisés sont les modèles logit et probit. Nous allons les présenter, ainsi que leurs extensions, dans les différentes parties de ce chapitre.

### 2.1.1.2 La transformation de Box et Cox

Pour des raisons de simplicité, on écrit habituellement la composante déterministe de la fonction d'utilité sous une forme linéaire :

$$(1c) \quad V_{in} = X_{in} \beta = \sum_{k=1}^K X_{ink} \beta_k$$

où  $X_{ink}$  est la valeur de la  $k$ -ième variable explicative pour l'individu  $n$  associée à la modalité  $i$ .  $\beta_k$  est le paramètre correspondant à estimer.

Le choix d'une forme linéaire peut se justifier par le fait qu'il s'agit d'une approximation au premier ordre d'une fonction d'utilité quelconque. Mais cette approximation n'est valable que localement et peut s'avérer trompeuse quand les variables explicatives et les niveaux d'utilité varient fortement. Il faut alors tenir compte d'éventuelles non linéarités de la fonction d'utilité par rapport à certaines variables explicatives. On peut le faire en utilisant des transformations logarithmiques ou quadratiques. Une solution plus générale consiste à introduire une transformation de Box et Cox (Gaudry et alii (1994)), ou plusieurs s'il le faut, définies par la fonction suivante :

$$BC_{\lambda} = \begin{cases} \frac{x^{\lambda} - 1}{\lambda} & \text{si } \lambda \neq 0, x > 0 \\ \ln(x) & \text{si } \lambda = 0, x > 0 \end{cases}$$

L'introduction de la transformation Box et Cox dans (1c) conduit à une écriture généralisée de la composante déterministe :

$$(1d) \quad V_{in} = X_{in}\beta = \sum_{k=1}^K X_{ink}^{\lambda} \beta_k$$

où  $X_{ink}^{\lambda} \equiv BC_{\lambda}(X_{ink})$

Le champ des formes fonctionnelles est ainsi élargi afin de rendre les modèle utilisés moins contraignants. Le calibrage se trouve quelque peu alourdi mais permet d'obtenir des gains substantiels de qualité de l'ajustement des paramètres. La transformation de Box et Cox souffre également d'une absence de fondement économique. Elle reste cependant intéressante dans l'optique d'un modèle de projection.

## 2.1.2 Modèle logit multinomial (MNL) : du modèle logit classique au BC-logit

### 2.1.2.1 Le logit classique :

On obtient le modèle logit multinomial classique quand les termes aléatoires  $\varepsilon_{in}$ ,  $i=1, \dots, J_n$ , des fonctions d'utilité sont indépendants, identiquement distribués et suivent une distribution de Gumbel de paramètres  $(\eta, \mu)$  dont la fonction de répartition cumulée est :

$$F(\varepsilon) = \exp(-\exp(-\mu(\varepsilon - \eta)))$$

$\mu$  est une constante positive et  $\eta$  est un paramètre de position. Les propriétés de cette distribution sont présentées dans Ben-Akiva et Lerman (1985). Lorsque les résidus  $\varepsilon_{in}$  suivent une loi de Gumbel de paramètres (0,1), la probabilité  $P_n(i)$  d'observer le choix  $i$  résultant d'une décision de l'individu  $n$  est donnée par :

$$(4) \quad P_n(i) = \frac{\exp(V_{in})}{\sum_{j \in C_n} \exp(V_{jn})} \quad i=1, \dots, J_n$$

En se référant aux variables explicatives définies dans l'équation (1a), la probabilité du choix observé s'écrit également sous la forme :

$$(4a) \quad P_n(i) = \frac{\exp(X_{in}\beta)}{\sum_{j \in C_n} \exp(X_{jn}\beta)} \quad i=1, \dots, J_n$$

La spécification du modèle logit multinomial (MNL) a le grand mérite de faciliter le calcul des probabilités  $P_n(i)$ . Cependant, elle présente également des inconvénients. Tout d'abord, la construction du modèle repose sur une hypothèse d'indépendance des résidus qui constitue une des composantes majeures de la fonction d'utilité. En ignorant la corrélation entre les erreurs, le modèle se heurte au problème connu sous le nom d'indépendance des alternatives non pertinentes (IIA). Autrement dit, le rapport des probabilités de choix de deux modes de transport  $i$  et  $j$  :

$$\frac{P_n(i)}{P_n(j)} = (X_{in} - X_{jn})\beta$$

ne dépend pas des autres choix possibles, appartenant à l'ensemble  $C_n$ , qui s'offrent à l'individu. Tout se déroule comme si les décisions de l'individu  $n$  étaient séparées au moment où il doit choisir l'alternative qui lui procure le maximum de satisfaction.

Par ailleurs, la représentation classique du modèle logit de base ne répond pas nécessairement aux attentes de la modélisation du choix modal de transport, car celle-ci nécessite l'usage de variables explicatives très particulières. La composante déterministe  $V_{in}$  doit prendre en considération deux types de variables :

$$(5) \quad V_{in} = X_{in}\beta = Z_{in}\theta + W_n\alpha_i$$

La composante déterministe dépend :

- de variables spécifiques aux modes de transport, comme les variables de coût et de temps, dont les valeurs changent d'une alternative à l'autre. Ces variables sont regroupées dans le vecteur  $Z_{in}$  de dimension  $(1, K_1)$  associé au vecteur colonne de paramètres  $\theta$  qui est commun à toutes les alternatives et à tous les individus.

- de variables spécifiques aux individus, représentées par le vecteur  $W_n$  de dimension  $(1, K - K_1)$ , affectées d'un vecteur colonne de paramètres,  $\alpha_i$ , variant d'une alternative à l'autre.

### 2.1.2.2 Les modèles logit et la composante déterministe

La spécification (5) de la composante déterministe permet de définir trois types de modèles logit. Tout d'abord, en se focalisant uniquement sur l'individu comme unité d'analyse et en utilisant seulement les caractéristiques individuelles comme variables explicatives ( $Z_{in} = 0$ ), on retrouve l'expression de  $P_n(i)$  dans le cadre d'un modèle logit généralisé :

$$P_n(i) = \frac{\exp(W_n \alpha_i)}{\sum_{j \in C_n} \exp(W_n \alpha_j)} = \frac{1}{\sum_{j \in C_n} \exp(W_n (\alpha_j - \alpha_i))}$$

La probabilité que l'individu  $n$  choisisse l'alternative  $i$  est expliquée par les caractéristiques individuelles qui sont constantes sur les différentes alternatives. En revanche, les  $J_n$  vecteurs de paramètres varient d'une alternative à l'autre. Puisque la somme des probabilités doit être égale à l'unité, les valeurs des paramètres ne sont pas déterminées de manière unique. Une solution consiste alors à éliminer un vecteur de paramètres, par exemple le dernier vecteur  $\alpha_{J_n}$ , en fixant  $\alpha_{J_n} = 0$ . Dans cette optique, le vecteur  $\alpha_i$  représente l'effet de la variable  $W_n$ ,  $n = 1, \dots, N$ , sur la probabilité de choisir l'alternative  $i$  par rapport à la dernière alternative  $J_n$ . Si le nombre d'alternatives est le même pour tous les individus, on estime  $J$  vecteurs de paramètres.

Le deuxième modèle est connu sous le nom de logit conditionnel. Dans celui-ci, on se focalise sur les différences entre alternatives ( $W_n = 0$ ). Les variables explicatives du vecteur  $Z_{in}$  diffèrent d'une alternative à l'autre, mais les composantes du vecteur  $\theta$  qui représentent les effets respectifs sur les variables explicatives figurant dans le vecteur  $Z_{in}$ , sont les mêmes pour toutes les alternatives. La probabilité que l'individu  $n$  choisisse l'alternative  $i$  est égale à :

$$P_n(i) = \frac{\exp(Z_{in}\theta)}{\sum_{j \in C_n} \exp(Z_{jn}\theta)} = \frac{1}{\sum_{j \in C_n} \exp((Z_{jn} - Z_{in})\theta)}$$

L'impact des variables sur la probabilité de choix découle de la différence de leurs valeurs entre les alternatives.

Le modèle logit mixte est le résultat d'une combinaison des deux approches, avec introduction simultanée des caractéristiques individuelles et des variables spécifiques aux alternatives. Il s'agit par conséquent d'utiliser la spécification (5) dans son intégralité, sans imposer des contraintes sur la matrice de variables explicatives. La probabilité de choix est alors définie de la manière suivante :

$$P_n(i) = \frac{\exp(Z_{in}\theta + W_n\alpha_i)}{\sum_{j \in C_n} \exp(Z_{jn}\theta + W_n\alpha_j)}$$

Comme dans le modèle logit généralisé, il faut tenir compte de contraintes imposées sur un des vecteurs  $\alpha_i$ .

Lorsqu'on introduit une spécification de type Box et Cox, décrite par (1d), dans la composante déterministe :

$$(1d) \quad V_{in} = X_{in}\beta = \sum_{k=1}^K X_{ink}^\lambda \beta_k$$

le modèle logit multinomial qui en résulte est connu sous le nom de BC-logit.

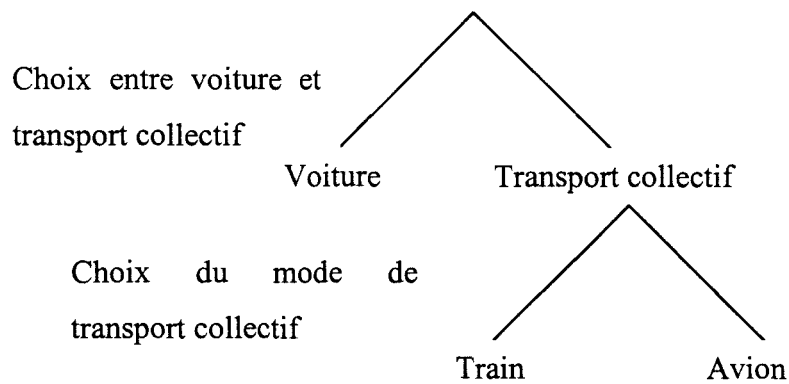
### 2.1.3 Modèles logit conjoint et emboîté

#### 2.1.3.1 Description de la décision séquentielle

Nous avons signalé plus haut que le modèle logit classique ne tient compte que des situations pour lesquelles la propriété d'indépendance des alternatives non pertinentes est satisfaite. Une manière d'éviter ce problème consiste à modéliser le processus de décision et des choix qui en résultent selon une procédure emboîtée en deux étapes.



Dans le cadre de cette recherche, l'individu  $n$ ,  $n = 1, \dots, N$ , doit d'abord choisir le mode de transport, voiture ou transport collectif, puis ensuite le type de mode de transport collectif, train ou avion. Les choix sont par conséquent hiérarchisés puisque le type de mode de transport collectif, train ou avion, ne constitue qu'une partition de l'ensemble  $C_n$  des combinaisons d'alternatives possibles. On peut illustrer au moyen d'un arbre de décision la procédure de choix en deux étapes.



Chaque nœud de l'arbre correspond à une étape de décision. Les branches partant de chaque nœud sont associées aux groupes de mode entre lesquels l'individu doit effectuer un choix.

Ce type d'approche peut être généralisé en considérant  $C_n$  comme un ensemble multidimensionnel dont les éléments sont définis comme des combinaisons de type de mode de transport  $d$  (individuel ou collectif) et du mode de transport spécifique  $m$ . En suivant l'approche de Ben-Akiva et Lerman (1985), on peut également définir à partir de  $C_n$  des ensembles de choix de type conditionnel ou marginal. Pour un individu  $n$ ,  $n=1, \dots, N$ , les ensembles de choix marginaux sont :

- $D_n$  pour le type de mode de transport : il s'agit de tous les modes de transport qui appartiennent au moins à un élément de  $C_n$  ;
- $M_n$  pour tous les modes de transport collectif (ou types de mode) qui appartiennent au moins à un élément de  $C_n$ .

Les ensembles de choix conditionnels sont définis comme des sous ensembles de  $D_n$  et  $M_n$  :

- $D_{nm}$  est le sous-ensemble de modes de transport qui s'offre à un individu  $n$  ayant opté pour un mode de transport collectif ou type de mode  $m$ ,
- $M_{nd}$  est un sous ensemble de modes de transport collectif qui sont réalisables pour un individu  $n$  ayant choisi un mode de transport  $d$ .

Dans ce contexte la fonction d'utilité prend la forme suivante (l'indice  $n$  sera délaissé pour simplifier la présentation) :

$$(6) \quad U_{dm} = \tilde{V}_d + \tilde{V}_m + \tilde{V}_{dm} + \varepsilon_{dm} + \varepsilon_m + \varepsilon_d \quad \text{pour tout } (m, d) \in C_n$$

où

- $\tilde{V}_d$  est la partie déterministe de l'utilité commune à tous les individus utilisant le type de mode de transport  $d$  (individuel ou collectif),
- $\tilde{V}_m$  est la partie déterministe de l'utilité commune à tous les individus utilisant, au sein du type de mode de transport  $d$  (transport collectif), le mode  $m$  (train ou avion),
- $\tilde{V}_{dm}$  est la partie déterministe de l'utilité spécifique à la combinaison  $(d, m)$ ,
- $\varepsilon_{dm}$  est la partie aléatoire de l'utilité correspondant à une combinaison  $(d, m)$  de modalités,
- $\varepsilon_d$  et  $\varepsilon_m$  sont respectivement les parties aléatoires spécifiques au mode et au type de mode.

### 2.1.3.2 Modèle logit conjoint

Ce modèle est construit en ne considérant qu'un cas particulier de la spécification (6), dans la mesure où on ignore les parties aléatoires spécifiques au mode et au type de mode :  $\varepsilon_m = \varepsilon_d = 0$ . On suppose que les termes d'erreur  $\varepsilon_{dm}$  suivent une distribution de Gumbel indépendante, identiquement distribuée, et de paramètres  $\eta=0$  et  $\mu = 1$ . Dans cette optique, le modèle logit conjoint, comme les autres modèles considérés jusqu'ici, vérifient l'hypothèse d'indépendance des alternatives non pertinentes.

Le modèle logit multinomial conjoint (ou MNL conjoint) est caractérisé par la probabilité individuelle de choix pour deux modalités (mode  $d$  et type de mode  $m$ ) :

$$(7) P_n(d, m) = \frac{\exp(\tilde{V}_d + \tilde{V}_m + \tilde{V}_{dm})}{\sum_{(d', m') \in C_n} \exp(\tilde{V}_{d'} + \tilde{V}_{m'} + \tilde{V}_{d'm'})}$$

Cette équation offre l'avantage par rapport au MNL classique de dériver deux types de probabilités fondées sur les ensembles des choix marginaux ( $D_n$  et  $M_n$ ) et conditionnels ( $D_{nm}$  et  $M_{nd}$ ) déjà définis plus haut. En effet, la probabilité conjointe du mode et du type de mode,  $P_n(d, m)$  est égale au produit  $P_n(m/d)$  d'une probabilité conditionnelle, autrement dit la probabilité de choisir un type de mode  $m$  sachant le mode  $d$ , et de la probabilité marginale du choix de mode  $d$ ,  $P_n(d)$  :

$$P_n(m, d) = P_n(m/d)P_n(d)$$

L'individu  $n$  choisira le mode  $d$  si la meilleure alternative multidimensionnelle contenant  $d$  lui procure une utilité globale plus élevée que la meilleure alternative ne contenant pas  $d$ . En termes de probabilité marginale de choix de  $d$ , on peut alors définir  $P_n(d)$  de la manière suivante :

$$(8) P_n(d) = P \left[ \max_{m \in M_{nd}} U_{dm} \geq \max_{m \in M_{nd'}} U_{d'm}, \text{ pour tout } d' \in D_n, d' \neq d \right]$$

Dans le cadre du MNL conjoint, l'utilité de la meilleure alternative dans  $C_n$  qui contient  $d$  peut également s'écrire sous la forme suivante en tenant compte de la spécification (6) :

$$\begin{aligned} \max_{m \in M_{nd}} U_{dm} &= \max_{m \in M_{nd}} (\tilde{V}_d + \tilde{V}_m + \tilde{V}_{dm} + \varepsilon_{dm}) \\ &= \tilde{V}_d + \max_{m \in M_{nd}} (\tilde{V}_m + \tilde{V}_{dm} + \varepsilon_{dm}) \end{aligned}$$

En exploitant la propriété de la loi de distribution de  $\varepsilon_{dm}$ , on montre que le maximum de l'utilité tirée, d'une part du type de mode  $m$ , et d'autre part de la combinaison des modalités  $m$  et  $d$ , suit également une loi de Gumbel de paramètre :

$$V_d' = \ln \left( \sum_{m \in M_{nd}} \exp(\tilde{V}_m + \tilde{V}_{dm}) \right)$$

$V_d'$  est appelé valeur inclusive. Elle représente l'utilité attendue du choix du mode  $d$  en anticipant les utilités des choix possibles de  $m$  à partir du mode  $d$ . La probabilité marginale de

choix du mode  $d$  est alors déterminée par la valeur inclusive propre à  $d$  et par la composante déterministe  $\tilde{V}_d$  spécifique à  $d$  :

$$(8a) \quad P_n(d) = \frac{\exp(\tilde{V}_d + V_d')}{\sum_{d' \in D_n} \exp(\tilde{V}_{d'} + V_{d'}')}$$

La probabilité de choix conditionnelle peut être exprimée de la manière suivante après simplification de son écriture :

$$(9) \quad P_n(m/d) = \frac{P_n(d, m)}{P_n(d)} = \frac{\exp(\tilde{V}_m + \tilde{V}_{dm})}{\sum_{m' \in M_{nd}} \exp(\tilde{V}_{m'} + \tilde{V}_{dm'})}$$

Ce sont les expressions décrites par les équations (8a) et (9) qui sont généralement utilisées dans la procédure d'estimation.

### 2.1.3.3 Le modèle logit emboîté

Le modèle logit emboîté (ou NMNL) permet de prendre en compte une certaine forme de dépendance entre les résidus de manière à ce que l'hypothèse des alternatives non pertinentes ne soit plus satisfaite.

En effet, revenons à la spécification (6) et supposons, comme dans la majorité des modèles de type NMNL, qu'un des termes d'erreur ( $\varepsilon_m$  ou  $\varepsilon_d$ ) est assez faible et peut donc être raisonnablement ignoré. On supposera ici que la variance de  $\varepsilon_m$  est nulle, ce choix étant motivé par un souci d'harmonisation des calculs de probabilité afin de mettre en lumière des éléments de différenciation par rapport au modèle logit conjoint.

La fonction d'utilité définie dans l'équation (6) s'écrit alors :

$$U_{dm} = \tilde{V}_d + \tilde{V}_m + \tilde{V}_{dm} + \varepsilon_d + \varepsilon_{dm}$$

Les hypothèses sur les résidus sont les suivantes :

- $\varepsilon_d$  et  $\varepsilon_{dm}$  sont indépendants,

- Les termes d'erreurs  $\varepsilon_{dm}$  sont indépendants, identiquement distribués et suivent une loi de Gumbel de constante  $\mu_m$ ,
- $\varepsilon_d$  ainsi que  $\max_{m \in M_{nd}} U_{dm}$  suivent une distribution de Gumbel de constante  $\mu_d$ .

On peut montrer, maintenant, que les utilités pour des types de mode différents,  $m$  et  $m'$ , sont corrélées et que, par conséquent, il existe une interdépendance entre les alternatives multidimensionnelles qui ont le même mode  $d$  :

$$\begin{aligned} \text{Cov}(U_{dm}, U_{dm'}) &= \text{Cov}(\varepsilon_d + \varepsilon_{dm}, \varepsilon_d + \varepsilon_{dm'}) \\ &= \text{var}(\varepsilon_d) \end{aligned}$$

En reprenant dans ce contexte la construction du modèle logit conjoint, on peut calculer la probabilité marginale de choisir le mode  $d$  :

$$(10) P_n(d) = P \left[ \max_{m \in M_{nd}} U_{dm} \geq \max_{m \in M_{nd'}} U_{d'm'}, \text{ pour tout } d' \in D_n, d' \neq d \right]$$

Dans le cadre du modèle logit emboîté, la maximisation de l'utilité peut également s'écrire sous la forme :

$$\begin{aligned} (11) \max_{m \in M_{nd}} U_{dm} &= \max_{m \in M_{nd}} (\tilde{V}_d + \tilde{V}_m + \tilde{V}_{dm} + \varepsilon_d + \varepsilon_{dm}) \\ &= \tilde{V}_d + \varepsilon_d + \max_{m \in M_{nd}} (\tilde{V}_m + \tilde{V}_{dm} + \varepsilon_{dm}) \end{aligned}$$

Puisque par hypothèse  $\varepsilon_{dm}$  suit une loi de Gumbel de paramètre  $\mu_m$ , l'expression

$$\max_{m \in M_{nd}} (\tilde{V}_m + \tilde{V}_{dm} + \varepsilon_{dm})$$

suit également la même loi mais avec un paramètre qui n'est autre que la valeur inclusive définie de la manière suivante :

$$(12) V_d' = \frac{1}{\mu_m} \ln \left( \sum_{m \in M_{nd}} \exp((\tilde{V}_m + \tilde{V}_{dm})\mu_m) \right)$$

La probabilité marginale définie dans l'équation (10) peut également s'écrire en utilisant (11) et (12) :

$$(10a) P_n(d) = P(\tilde{V}_d + V_d' + \varepsilon_d^* \geq \tilde{V}_{d'} + V_{d'}' + \varepsilon_{d'}^*, \text{ pour tout } d' \in D_n, d' \neq d)$$

où  $\varepsilon_d^* = \varepsilon_d + \tilde{\varepsilon}_d$  et  $\tilde{\varepsilon}_d = \max_{m \in M_{nd}} (\tilde{V}_m + \tilde{V}_{dm} + \varepsilon_{dm}) - V_d$

En partant du résultat que  $\varepsilon_d^*$  suit une loi de Gumbel de paramètre  $\mu_d$ , la probabilité marginale de choisir  $d$  s'écrit finalement sous la forme :

$$(13) P_n(d) = \frac{\exp((\tilde{V}_d + V_d')\mu_d)}{\sum_{d' \in D_n} \exp((\tilde{V}_{d'} + V_{d'})\mu_{d'})}$$

On peut établir ici une première comparaison entre le logit conjoint et le logit emboîté. L'expression de la probabilité marginale du logit conjoint définie en (8a) est très proche de celle définie en (13). Le seul élément de différenciation est la présence des paramètres d'hétérogénéité  $\mu_m$ , par l'intermédiaire de (12), et  $\mu_d$ . Or, ces deux paramètres jouent un rôle important dans l'explication de la dépendance des choix, puisqu'ils sont les seuls déterminants de la corrélation entre les utilités :

$$(14) \text{corr}(U_{dm}, U_{dm'}) = 1 - (\mu_d / \mu_m)^2$$

La probabilité conditionnelle est définie de la manière suivante :

$$(15) P_n(m/d) = \frac{\exp((\tilde{V}_m + \tilde{V}_{dm})\mu_m)}{\sum_{m' \in M_{nd}} \exp((\tilde{V}_{m'} + \tilde{V}_{dm'})\mu_{m'})}$$

La probabilité conditionnelle du modèle conjoint, donnée par (9), se distingue de celle exprimée par (15), par la présence du paramètre d'hétérogénéité  $\mu_m$ . Ce dernier est relié à  $\mu_d$  en raison de la dépendance des choix décrite par (14).

Par conséquent, contrairement aux modèles logit, décrits jusqu'ici, on peut conclure que le logit emboîté constitue une forme généralisée de tous les modèles appartenant à cette famille. Il offre, en effet, la possibilité à l'économetre d'intégrer directement dans les probabilités (13) et (15) des paramètres d'hétérogénéité qui traduisent la dépendance des choix. Cependant, dans la pratique, la procédure d'estimation des probabilités impose une contrainte sur l'un des paramètres, par exemple  $\mu_m = 1$ . Dans ce contexte, si la valeur estimée de  $\mu_d$  est égale à l'unité, le modèle logit initialement emboîté se transforme en logit conjoint.

## 2.1.4 Modèle probit multinomial

### 2.1.4.1 Modèle probit classique

Le logit emboîté permet de prendre en considération une certaine forme de corrélation entre les résidus des fonctions d'utilité. Cependant, il faut se rappeler que la dépendance des choix n'a été obtenue que par la décomposition du terme d'erreur dans (6) en composantes spécifiques au mode de transport ou au type de mode.

D'autres modèles, intégrant de manière explicite la dépendance des choix, ont été proposés. Le plus connu est le modèle probit multinomial (MNP). Dans le cadre de ce modèle, les erreurs suivent une loi normale multivariée de moyenne nulle et dont la matrice de variances-covariances admet la corrélation entre les erreurs des alternatives auxquelles l'individu  $n$  est confronté. Pour la présentation de ce modèle, il est utile de reconsidérer la structure du modèle à choix discrets décrit par (1a) et (1b) :

$$(1b) \ y_{in} = \begin{cases} 1 & \text{si } U_{in} \geq U_{jn} \text{ pour } j = 1, \dots, J \\ 0 & \text{sinon, et} \end{cases}$$

$$U_{in} = X_{in}\beta + \varepsilon_{in}$$

On supposera, pour simplifier, que l'ensemble des choix  $C_n$  contient le même nombre d'alternatives  $J$  quel que soit l'individu  $n$ ,  $n = 1, \dots, N$ .

Sous une forme vectorielle compacte, obtenue en empilant les variables sur les  $J$  alternatives, les informations latentes et observables concernant l'individu  $n$  sont décrites par la structure suivante :

$$y_n = [y_{1n}, \dots, y_{Jn}]'$$

$$(16) \ U_n = X_n\beta + \varepsilon_n \text{ avec } \varepsilon_n \sim N(0, \Sigma) \ n = 1, \dots, N.$$

où  $y_n$ ,  $U_n$  et  $\varepsilon_n$  sont des vecteurs de dimension  $(J, 1)$ ,  $X_n$  est une matrice de variables explicatives de dimension  $(J, K)$  et  $\Sigma$  est la matrice de variances-covariances des erreurs, de

dimension  $(J, J)$ . Comme la structure de la matrice de variances-covariances est arbitraire, le mode MNP fournit à l'économetre un instrument pour modéliser les différentes configurations d'interdépendance entre les modalités.

La forme estimable du modèle, souvent utilisée dans la littérature, est celle obtenue à partir du modèle de choix en différence. Ce dernier s'écrit en termes de déviation par rapport à l'utilité de l'alternative choisie par l'individu  $n$  :

$$\begin{aligned} \tilde{y}_n &= [\tilde{y}_{1n}, \dots, \tilde{y}_{(J-1)n}]' \\ (17) \quad \tilde{U}_n &= \tilde{X}_n \beta + \tilde{\varepsilon}_n \quad \text{avec } \tilde{\varepsilon}_n \sim N(0, \Omega) \quad n=1, \dots, N. \end{aligned}$$

Le choix  $i$  observé est lié à la différence d'utilité  $\tilde{U}_{jn} = U_{jn} - U_{in}$ , pour  $j=1, \dots, J-1$  et  $j \neq i$  :

$$\tilde{y}_{jn} = \begin{cases} 1 & \text{si } \tilde{U}_{jn} \leq 0, \quad j = 1, \dots, J-1 \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$$

Les vecteurs  $\tilde{U}_n$ ,  $\tilde{y}_n$  et  $\tilde{\varepsilon}_n$ , les composantes de ce dernier étant de la forme  $\tilde{\varepsilon}_{jn} = \varepsilon_{jn} - \varepsilon_{in}$ , sont de dimension  $(J-1, 1)$ ; la matrice  $\tilde{X}_n$ , de dimension  $(J-1, K)$ , contient les vecteurs lignes  $\tilde{X}_{jn} = X_{jn} - X_{in}$ . La probabilité qui correspond au choix  $i$  est de la forme :

$$\begin{aligned} (18) \quad P_n(i) &= P[\tilde{U}_{jn} \leq 0 \text{ pour tout } j = 1, \dots, J-1] \\ &= \int_{-\infty}^{(X_{1n} - X_{in})\beta} \dots \int_{-\infty}^{(X_{Jn} - X_{in})\beta} n(\tilde{\varepsilon}_{1n}, \dots, \tilde{\varepsilon}_{Jn}; \Omega) d\tilde{\varepsilon}_{Jn} \dots d\tilde{\varepsilon}_{1n} \end{aligned}$$

où  $n(\tilde{\varepsilon}; \Omega)$  représente la fonction de densité d'une loi normale multivariée de moyenne nulle et de matrice de variances covariances  $\Omega$ . Si l'on n'impose pas de contrainte sur cette matrice, la dimension de l'intégrale multiple qui se trouve dans l'expression de la probabilité est égale à  $J-1$ .

Sur le plan de l'estimation, le premier obstacle auquel est confronté l'économetre est le calcul des intégrales de dimension  $J-1$  pour chaque individu  $n$  considéré. Le deuxième est lié au nombre de paramètres à estimer dans la matrice  $\Omega$ . Ce dernier est une fonction croissante du nombre d'alternatives, car sans restriction sur  $\Omega$  il existe au total  $(J-1)(J-2)/2$  paramètres de covariances à estimer. Il faut également tenir compte du nombre de paramètres  $\beta$  à estimer.



Ces difficultés peuvent expliquer une forte préférence pour des modèles logit plus accessibles sur le plan opérationnel, notamment pour le logit emboîté qui présente des propriétés intéressantes.

#### 2.1.4.2 Modèle Probit avec noyau logit

On vient de noter que la principale difficulté liée à l'utilisation du modèle probit multinomial se situe dans le calcul des probabilités de choix, décrites par (18), qui sont exprimées sous forme d'intégrales normales multidimensionnelles. Pour la résoudre, on peut utiliser une version du modèle probit caractérisée par un noyau logit. Ce dernier permet de réduire la dimension de l'intégrale multiple, ainsi que le nombre de paramètres de covariance à estimer.

Considérons le modèle (16) et décomposons le vecteur d'erreurs  $\varepsilon_n$  :

$$\varepsilon_n = \xi_n + v_n$$

On suppose que la première composante,  $\xi_n$  suit une loi normale multivariée définie selon la procédure suivante :

$$\xi_n = F_n v_n$$

où

- $v_n$  est un vecteur de dimension  $(M,1)$ , avec  $M < J$ , de variables aléatoires indépendantes, identiquement distribuées, qui suivent une loi normale centrée et réduite :  $v_n \sim N(0, I_M)$ ,
- $F_n$  est une matrice de dimension  $(J, M)$  qui permet de saisir les interdépendances entre les alternatives,
- $v_n$  est identiquement et indépendamment distribuée entre les alternatives, suivant une loi de Gumbel.

Les variables latentes de (16) s'écrivent alors sous la forme :

$$(16a) \quad U_n = X_n \beta + F_n v_n + v_n$$

d'où

$$E(U_n) = X_n \beta \text{ et } \text{cov}(U_n) = F_n F_n' + g I_J$$

$g$  étant la variance de la loi de probabilité de Gumbel.

Puisque  $v_n$  suit une loi de Gumbel, conditionnellement à  $v_n$ , la probabilité de choix prend la forme d'un logit multinomial :

$$(19) P_n(i/v) = \frac{\exp(X_{in}\beta + F_{in}v)}{\sum_{j \in C_n} \exp(X_{jn}\beta + F_{jn}v)} \text{ avec } v \sim N(0, I_M)$$

La probabilité de choix non conditionnelle de la modalité  $i$  s'obtient en intégrant  $P_n(i/v)$  sur  $v$  :

$$(20) P_n(i) = \int P_n(i/v) n(v, I_M) dv \\ = E_v[P_n(i/v)]$$

Rappelons que  $n(v, I_M)$  désigne la fonction de densité d'une loi normale multivariée de moyenne nulle et de matrice de variances-covariances  $I_M$ . La probabilité de choix est alors égale à l'espérance de la probabilité conditionnelle,  $P_n(i/v)$ , d'un logit multinomial. La dimension de l'intégrale dans (20) est égale  $M$ .

L'approche par le noyau logit permet de réduire sensiblement la dimension de l'intégrale, puisque pour le même modèle de choix discrets, un probit classique aurait engendré un calcul de l'intégrale à  $J$  dimensions, avec  $J > M$ . De plus, si dans la matrice  $F_n$  un petit nombre d'éléments suffit pour tenir compte de la majorité des interdépendances entre les alternatives, des simplifications de calculs permettront d'estimer plus facilement les paramètres de (20).

## 2.1.5 Modèles à paramètres aléatoires

### 2.1.5.1 Modèle Logit à paramètres aléatoires

Dans le modèle logit, les coefficients estimés sont constants (fixés pour tous les individus). De ce fait, on suppose que l'effet des variables explicatives est le même pour tous les individus et que la composante aléatoire du modèle s'ajoute à la composante déterministe. Or, avec une population hétérogène, les effets des variables explicatives sont susceptibles de

varier d'un individu à l'autre (Bolduc (1992), McFadden et Train (2000)). Par exemple, la valeur du temps peut être influencée par des caractéristiques non observables spécifiques aux individus. Ceci entraîne l'existence d'une hétérogénéité non observable. Il est important d'en tenir compte car l'effet risque de se refléter sur la valeur des coefficients estimés.

Considérons la fonction de coût généralisé de transport associé à une modalité  $i$ , pour un individu  $n$

$$U_{in} = \mu(C_{in} + \gamma T_{in} + X_{in} \beta^*) + \varepsilon_{in}$$

Pour chaque individu  $n$  et pour chaque modalité  $i$ ,  $C_{in}$  et  $T_{in}$  sont respectivement le coût de trajet et le temps de transport;  $X_{in}$  est un vecteur ligne d'attributs observables supplémentaires et  $\beta^*$  est un vecteur colonne d'ordre approprié. On suppose que les résidus  $\varepsilon_{in}$  sont indépendants, identiquement distribués, et suivent une loi de Gumbel.

Le paramètre qui permet de mesurer la valeur du temps est  $\gamma$ . Puisqu'il peut être affecté par des caractéristiques individuelles non observables, on peut supposer qu'il est aléatoire et suit une loi de distribution log-normale. Le choix de cette distribution est justifié par le fait que la valeur du temps suivrait la même loi de distribution que le revenu des ménages, dont on sait qu'elle est log-normale.

La fonction de densité de  $\gamma$  s'écrit alors sous la forme :

$$f(\gamma) = (2\pi\sigma^2\gamma^2)^{-1/2} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln \gamma - \omega}{\sigma}\right)^2\right] = \frac{1}{\gamma} n(\omega, \sigma^2)$$

$n(\omega, \sigma^2)$  est la fonction de densité d'une loi normale de moyenne  $\omega$  et de variance  $\sigma^2$ .

En conditionnant sur la valeur du temps, la probabilité de la modalité  $i$  s'écrit :

$$P_n(i/\gamma) = \frac{\exp(\mu(C_{in} + \gamma T_{in} + X_{in} \beta^*))}{\sum_{j=1}^J \exp(\mu(C_{jn} + \gamma T_{jn} + X_{jn} \beta^*))}$$

La probabilité de choix non conditionnel de la modalité  $i$  s'obtient en intégrant sur la valeur du temps :

$$P_n(i) = \int_0^{\infty} P_n(i/\gamma) \frac{1}{\gamma} n(\omega, \sigma^2) d\gamma$$

L'expression de cette probabilité est une forme particulière et plus simple du modèle à noyau logit. L'intégrale est de dimension 1 et la valeur du temps  $\gamma$  suit une loi normale univariée de moyenne  $\omega$  et de variance  $\sigma^2$ . Cependant, ce modèle à coefficient aléatoire reste fondé sur l'hypothèse d'indépendance des alternatives non pertinentes puisque les résidus  $\varepsilon_{in}$  suivent une loi de Gumbel et que la valeur du temps, à elle seule, ne peut introduire une dépendance des choix.

### 2.1.5.2 Modèle probit à paramètres aléatoires

La dépendance des choix peut être introduite de plusieurs manières dans le modèle de choix discrets. La première façon consiste à adopter une spécification de type logit emboîté ou probit multinomial classique. La seconde revient à décomposer le vecteur des résidus comme dans le modèle probit à noyau logit. Mais il existe également une troisième possibilité que l'on obtient en se focalisant sur la structure du vecteur des paramètres à estimer. En effet, considérons le modèle de choix discrets dans lequel le vecteur des paramètres varie d'un individu à l'autre sur l'ensemble des  $J$  alternatives :

$$(16b) U_n = X_n \beta_n + v_n$$

où le vecteur d'erreurs  $v_n$  suit une loi de Gumbel i.i.d (indépendante et identiquement distribuée).

Le vecteur des paramètres  $\beta_n$ , d'ordre  $(K,1)$ , est considéré comme aléatoire. Il suit une loi normale multivariée de matrice de variances-covariances  $\Sigma_\beta$ , de dimension  $(K,K)$ , que l'on peut écrire comme un produit de deux matrices triangulaires en suivant l'approche de Cholesky :

$$\Sigma_\beta = \Gamma \Gamma'$$

$\beta_n$  peut être décomposé en une partie déterministe  $\beta$ , d'ordre  $(K,1)$ , et une partie aléatoire  $\Gamma \xi_n$  qui introduit la dépendance des choix :

$$\beta_n = \beta + \Gamma \xi_n$$

où  $\xi_n$  suit une loi normale multivariée  $N(0, I_K)$ .

En introduisant l'expression de  $\beta_n$  dans (16b), le vecteur des utilités s'écrit :

$$(16c) \quad U_n = X_n \beta + X_n \Gamma \xi_n + v_n$$

En posant  $F_n = X_n \Gamma$ , on retrouve l'expression (16a) du modèle probit à noyau logit. Mais dans (16c), la matrice des variables explicatives  $X_n$  participe également à la formation de la dépendance des choix.

## 2.2 Estimation des modèles

### 2.2.1 Le principe du maximum de vraisemblance

La méthode d'estimation la plus utilisée pour les modèles de choix discret est le maximum de vraisemblance. Le principe du maximum de vraisemblance (MV) consiste à retenir la valeur  $\hat{\delta}_{MV}$  de  $\delta$  qui maximise

$$(21) L_N(\delta) = \sum_{n=1}^N \ln f(y_n / X_n, \delta)$$

où  $f(y_n / X_n, \delta)$  est la probabilité d'observer le choix effectué par un individu  $n$  sur l'ensemble des  $J$  alternatives quand  $X_n$  désigne sa matrice de variables explicatives et que le vecteur de paramètres est égal à  $\delta$ .  $f(y_n / X_n, \delta)$  s'écrit :

$$f(y_n / X_n, \delta) = \prod_{i=1}^J P_n(i)^{y_{in}}$$

La log- vraisemblance associée à l'estimation des différents modèles devient alors :

$$(21a) L_N = \sum_{n=1}^N \sum_{i=1}^J y_{in} \ln P_n(i)$$

Le score de vraisemblance, défini comme la dérivée de la log-vraisemblance par rapport aux paramètres, s'écrit :

$$(22) \frac{\partial L_n(\delta)}{\partial \delta} = \sum_{n=1}^N \frac{\partial \log f(y_n / X_n; \delta)}{\partial \delta} = \sum_{n=1}^N \sum_{i=1}^J \frac{y_{in}}{P_n(i)} \frac{\partial P_n(i)}{\partial \delta} = 0$$

En sachant que  $\sum_{i=1}^J P_n(i) = 1$  et donc  $\sum_{i=1}^J \frac{\partial P_n(i)}{\partial \delta} = 0$ , on peut réécrire le score de l'équation ci-dessus sous une forme équivalente :

$$(22a) \frac{\partial L_n(\delta)}{\partial \delta} = \sum_{n=1}^N \sum_{i=1}^J \frac{1}{P_n(i)} \frac{\partial P_n(i)}{\partial \delta} [y_{in} - P_n(i)] = 0$$

L'estimateur  $\hat{\delta}_{MV}$  des équations de vraisemblance (22) est obtenu par l'application d'un algorithme de résolution numérique fondé sur la méthode de Newton. Dans la pratique, on dispose d'un certain nombre de techniques de résolution, la plus connue est l'algorithme de Newton-Raphson.

L'expression (22a) conduit également à la méthode des moments car elle met en lumière une condition d'orthogonalité entre un résidu  $y_{in} - P_n(i)$ , de moyenne nulle, et un instrument représenté par  $\partial \ln P_n(i) / \partial \delta$ . De façon générale, dans le cadre de l'estimation d'un modèle de choix discrets, la méthode des moments généralisés (MG) cherche à déterminer  $\hat{\delta}_{MV}$  pour laquelle l'expression :

$$(22b) \quad S(\delta) = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^J G_{in} [y_{in} - P_n(i)]$$

est la plus proche possible de zéro,  $G_{in}$  étant un instrument orthogonal avec le vecteur des résidus  $y_{in} - P_n(i)$ . L'estimateur des moments généralisés est la solution du problème suivant :

$$(22c) \quad \underset{\delta}{\text{Min}} S(\delta)' D_N S(\delta)$$

où  $D_N$  est une matrice de direction choisie de manière appropriée. Par exemple, dans certaines études,  $D_N$  est une matrice identité  $I_N$ .

### 2.2.2 Estimation des modèles Logit classique et emboîté

La méthode la plus directe pour estimer un modèle logit classique consiste à écrire sa fonction de vraisemblance et à procéder ensuite à sa maximisation. La log-vraisemblance est obtenue en introduisant (4a) dans (21a)

$$L_N(\beta) = \sum_{n=1}^N \sum_{i=1}^J y_{in} (X_{in} \beta - \ln(\sum_{j=1}^J \exp(X_{jn} \beta)))$$

La fonction de vraisemblance associée aux modèles logit conditionnel, généralisé et mixte, présentés dans le paragraphe 2.1.2.1 s'obtient de la même manière que celle du logit classique. Il suffit de remplacer les  $P_n(i)$  de (21a) par leurs expressions respectives.

En ce qui concerne le modèle logit emboîté, il est préférable de revenir à la spécification (6) du paragraphe 2.1.3 et de définir les composantes déterministes de la manière suivante :

$$(23) \quad \begin{aligned} \tilde{V}_m &= X_m \beta_m \\ \tilde{V}_d &= X_d \beta_d \\ \tilde{V}_{dm} &= X_{dm} \beta_{dm} \end{aligned}$$

où

- $X_m$ ,  $X_d$  et  $X_{dm}$  sont des vecteurs ligne contenant les attributs respectifs de la nature du transport, des modes de transport et de la combinaison mode/nature ;
- $\beta_m$ ,  $\beta_d$  et  $\beta_{dm}$  sont des vecteurs colonne, de dimension appropriée, des paramètres à estimer.

De même, il est utile de rappeler ici les expressions des probabilités marginales (13) et conditionnelles (15) :

$$(13) \quad P_n(d) = \frac{\exp((\tilde{V}_d + V_d')\mu_d)}{\sum_{d' \in D_n} \exp((\tilde{V}_{d'} + V_{d'})\mu_{d'})}$$

où la valeur inclusive est  $V_d' = \frac{1}{\mu_m} \ln \left( \sum_{m \in M_{nd}} \exp((\tilde{V}_m + \tilde{V}_{dm})\mu_m) \right)$

$$(15) \quad P_n(m/d) = \frac{\exp((\tilde{V}_m + \tilde{V}_{dm})\mu_m)}{\sum_{m' \in M_{nd}} \exp((\tilde{V}_{m'} + \tilde{V}_{dm'})\mu_{m'})}$$

Les vecteurs de paramètres  $\beta_m$ ,  $\beta_d$  et  $\beta_{dm}$  ainsi que les constantes  $\mu_d$  et  $\mu_m$ , qui doivent être estimés, sont regroupés dans un vecteur  $\delta$ . La log-vraisemblance correspondant au modèle logit emboîté s'écrit alors :

$$\begin{aligned} L_N(\delta) &= \sum_{n=1}^N \sum_{(d,m) \in C_n} y_{dmn} P_n(m/d) + \sum_{n=1}^N \sum_{(d,m) \in C_n} y_{dmn} P_n(d) \\ &= \sum_{n=1}^N \sum_{m \in M_{nd^*}} y_{mn} P_n(m/d^*) + \sum_{n=1}^N \sum_{d \in D_n} y_{dn} P_n(d) \end{aligned}$$

où  $y_{dmn} = \begin{cases} 1 & \text{si l'individu } n \text{ choisit l'alternative } (d,m) \in C_n \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$



$$y_{mn} = \begin{cases} 1 & \text{si l'individu } n \text{ choisit le type de mode } m \in M_{nd^*} \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$$

$$y_{dn} = \begin{cases} 1 & \text{si l'individu } n \text{ choisit le mode } d \in D_n \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$$

où  $d^*$  désigne le mode choisi.

On peut remarquer que la log-vraisemblance est composée de deux éléments qui correspondent aux log-vraisemblances de deux modèles logit classiques. Il s'agit des log-vraisemblances des probabilités marginale et conditionnelle. On peut alors appliquer une procédure d'estimation séquentielle. Cette procédure se décompose en trois étapes :

1. estimer  $\beta_{dm}$  et  $\beta_m$  par le maximum de vraisemblance dans le modèle conditionnel  $P_n(m/d)$  en supposant que  $\mu^m = 1$ ,
2. en utilisant  $\hat{\beta}_{dm}$  et  $\hat{\beta}_m$ , estimés lors de l'étape 1, on calcule la valeur inclusive :

$$\hat{V}_d' = \log \sum_{m \in M_{nd}} \exp(X_m \beta_m + X_{dm} \beta_{dm}) \text{ pour tous les } d \in D_n$$

3. en utilisant  $\hat{V}_p$  comme une variable indépendante, on estime par le maximum de vraisemblance les paramètres  $\beta_d$  et  $\mu_d$  dans le modèle marginal  $P_n(d)$ .

On peut remarquer que si l'on suppose  $\mu_d = 1$ , on obtient les résultats d'estimation d'un modèle logit conjoint.

### 2.2.3 Estimation du modèle Probit

Dans le paragraphe 2.1.4, consacré à la présentation des modèles probit (MNP), nous avons mis l'accent sur le problème de dimension des intégrales auquel est confronté l'économetre dans la pratique. Cependant, les progrès réalisés en analyse numérique et l'apparition des ordinateurs de plus en plus performants ont contribué au développement des techniques statistiques qui permettent d'estimer ces modèles.

### 2.2.3.1 L'approximation numérique :

Pour illustrer l'approche numérique, reconsidérons le modèle de choix discrets en différence du paragraphe 2.1.4.1 :

$$\tilde{y}_n = [\tilde{y}_{1n}; \dots; \tilde{y}_{(J-1)n}]'$$

$$(17) \tilde{U}_n = \tilde{X}_n \beta + \tilde{\varepsilon}_n \text{ avec } \tilde{\varepsilon}_n \sim N(0, \Omega) \quad n=1, \dots, N.$$

où  $\tilde{U}_{jn} = U_{jn} - U_{in}$ ,  $\tilde{\varepsilon}_{jn} = \varepsilon_{jn} - \varepsilon_{in}$ ,  $\tilde{X}_{jn} = X_{jn} - X_{in}$  pour  $j=1, \dots, J-1$  et  $j \neq i$  :

$$\text{et } \tilde{y}_{jn} = \begin{cases} 1 & \text{si } \tilde{U}_{jn} \leq 0, \quad j = 1, \dots, J-1 \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$$

En appliquant une décomposition de Cholesky à la matrice de variances-covariances,  $\Omega$  de dimension  $(J-1, J-1)$ , (17) s'écrit :

$$\tilde{U}_n = \tilde{X}_n \beta + S w_n \text{ avec } w_n \sim N(0, I_{J-1})$$

où  $\tilde{\varepsilon}_n = S w_n$ ,  $S$  est une matrice triangulaire vérifiant l'égalité  $\Omega = S S'$ , ayant donc la structure suivante :

$$S = \begin{bmatrix} S_{11} & 0 & \dots & 0 \\ S_{21} & S_{22} & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ S_{J-1,1} & S_{J-1,2} & \dots & S_{J-1,J-1} \end{bmatrix}$$

La probabilité de l'alternative choisie est définie par :

$$P_n(i) = P(\tilde{U}_n \leq 0) = P(\tilde{U}_1 \leq 0, \tilde{U}_2 \leq 0, \dots, \tilde{U}_{J-1} \leq 0)$$

En se rappelant que  $\tilde{U}_n$  est un vecteur de dimension  $(J-1, 1)$ , la contrainte  $\tilde{U}_n \leq 0$  représente un ensemble de  $J-1$  inégalités :

$$\begin{bmatrix} \tilde{U}_1 \\ \tilde{U}_2 \\ \vdots \\ \tilde{U}_{J-1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tilde{X}_1 \beta \\ \tilde{X}_2 \beta \\ \vdots \\ \tilde{X}_{J-1} \beta \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} S_{11} & 0 & \dots & 0 \\ S_{21} & S_{22} & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ S_{J-1,1} & S_{J-1,2} & \dots & S_{J-1,J-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} w_1 \\ w_2 \\ \vdots \\ w_{J-1} \end{bmatrix} \leq 0$$

La structure triangulaire joue un rôle très important dans la procédure d'estimation du modèle MNP car elle permet de dériver une relation de récursivité entre les résidus. En effet, le développement des contraintes d'inégalité conduit aux relations suivantes entre les composantes du vecteur d'erreurs  $w_n$  :

$$\begin{aligned} w_1 &\leq -\frac{\tilde{X}_1\beta}{S_{11}} = W_1, \\ (24) \quad w_2 &\leq -\frac{\tilde{X}_2\beta - S_{21}w_1}{S_{22}} = W_2(w_1), \\ w_{J-1} &\leq W_m(w_1, w_2, \dots, w_{(J-1)-1}), \end{aligned}$$

où

$$W_{J-1} = -\left[ \sum_{h=1}^{(J-1)-1} \frac{S_{J-1,h}}{S_{J-1,J-1}} w_h + \frac{X_{J-1}\beta}{S_{J-1,J-1}} \right]$$

La récursivité des résidus se présente de la manière suivante : en conditionnant sur  $w_1$ , la variable aléatoire  $w_2$  suit une loi normale centrée et réduite qui est tronquée à droite au point  $W_2(w_1)$  ; de façon similaire, en conditionnant sur  $w_1$  et  $w_2$ , l'erreur  $w_3$  suit une loi centrée et réduite avec un point de troncature à droite  $W_3(w_1, w_2)$ , cette relation séquentielle se poursuit jusqu'à la dernière variable aléatoire  $w_{J-1}$ .

La probabilité de choix qui en résulte se présente sous la forme :

$$(25) \quad P_n(i) = P(\tilde{U}_n \leq 0) = P(w_1 \leq W_1, w_2 \leq W_2(w_1), \dots, w_{J-1} \leq W_{J-1}(w_1, \dots, w_{(J-1)-1}))$$

Les premières techniques d'estimation ont utilisé l'intégration numérique pour calculer la probabilité (25) :

$$P_n(i) = \int_{w_1=-\infty}^{W_1} \varphi(w_1) \int_{w_2=-\infty}^{W_2(w_1)} \dots \int_{w_{J-2}=-\infty}^{W_{J-2}(w_1, \dots, w_{J-3})} \Phi[W_{J-1}(w_1, \dots, w_{J-2})] \varphi(w_{m-1}) dw_1 \dots dw_{J-2}$$

où  $\varphi(.)$  et  $\Phi(.)$  sont respectivement la fonction de densité et de répartition d'une loi normale centrée réduite.

L'intégrale obtenue est de dimension  $J-2$ . Cependant, pour  $J > 5$ , elle devient presque impossible à calculer si l'on se fixe un temps de calcul assez réduit. La méthode d'intégration

numérique apporte, toutefois, une précision bien meilleure dans l'estimation des probabilités de choix.

Une autre approche, appelée approximation numérique, a été utilisée dans le cadre des techniques d'estimation standard comme le maximum de vraisemblance (MV) ou la méthode des moments généralisés (MG). Elle consiste à remplacer les probabilités de choix situés dans la fonction de vraisemblance (21a) et dans la fonction objectif des MG, (22b) et (22c), par des fonctions qui s'adaptent plus facilement au calcul. Mais l'approximation numérique a fait l'objet d'un certain nombre de critiques. En particulier, lorsqu'on augmente la taille de l'échantillon, elle n'a pas de bonnes propriétés asymptotiques.

La récursivité des erreurs, engendrée par la matrice  $S$ , n'a pas fait l'objet d'une très grande exploitation dans cette approche, alors qu'elle a joué un rôle plus important dans la simulation stochastique.

### **2.2.3.2 La simulation stochastique : Simulateurs récursifs et de type noyau**

Les développements rapides de l'informatique ont rendu possible l'évaluation des probabilités de choix fondée sur l'utilisation des simulateurs stochastiques. Celle-ci consiste à remplacer les probabilités  $P_n(i)$  de la log-vraisemblance (21a) et de la fonction objectif des MG, (22b) et (22c), par des moyennes empiriques de fonctions calculées à partir de simulateurs stochastiques sans biais et dotés de bonnes propriétés asymptotiques. Ces moyennes empiriques sont appelées des simulateurs. L'utilisation de ces simulateurs dans la log-vraisemblance et dans la fonction objectif des moments généralisés a conduit respectivement à la méthode du maximum de vraisemblance simulée (MVS) et à celle des moments généralisés simulés (MGS). La méthode des MGS a été développée par McFadden (1989) et Pakes et Pollard (1989), alors que celle du MVS tire son origine des travaux de Börsch-Supan et Hajivassiliou (1990). En ce qui concerne ces deux méthodes, on ne présentera ici que les simulateurs proposés par Börsch-Supan et Hajivassiliou (1990) et par Ben-Akiva et Bolduc (1996).

Börsch-Supan et Hajivassiliou (1990) ont construit un simulateur récursif conditionnel en exploitant la récursivité des erreurs dans (24). Pour calculer  $P_n(i)$ , l'approche suggère d'effectuer  $R$  tirages à partir du vecteur des erreurs  $w_r$ ,  $r=1, \dots, R$ , ces dernières suivant une loi normale centrée réduite et tronquée à droite. Les calculs sont effectués de manière récursive en se basant sur la définition de la probabilité conditionnelle. La probabilité de choix de l'alternative  $i$  peut alors être approchée par la moyenne empirique :

$$P_n(i) = \frac{1}{R} \sum_{r=1}^R P_{nr}(i)$$

où

$$P_{nr}(i) = \Phi(W_{1r})\Phi(W_{2r}(w_{1r})/w_{1r})\dots\Phi(W_{(J-1)r}(w_{1r}, \dots)/w_{1r}, \dots)$$

est un produit d'intégrales normales univariées. La fonction de log vraisemblance qui se prête à la simulation s'écrit alors :

$$L_N(\beta) = \sum_{n=1}^N \ln \left[ \frac{1}{R} \sum_{r=1}^R \prod_{i=1}^{J-1} P_{nr}(i) \right]$$

Les auteurs ont démontré que le simulateur récursif conditionnel est sans biais et possède de bonnes propriétés asymptotiques.

L'approche proposée par Ben Akiva et Bolduc (1996) consiste à remplacer la probabilité par un simulateur de type noyau logistique dans la fonction de log-vraisemblance. En se référant au modèle probit avec un noyau logit, présenté au paragraphe 2.1.4.2, on se rappelle que la probabilité s'écrit :

$$\begin{aligned} (20) \quad P_n(i) &= \int P_n(i/v) n(v, I_M) dv \\ &= E_v [P_n(i/v)] \end{aligned}$$

où

$$(19) \quad P_n(i/v) = \frac{\exp(X_{in}\beta + F_{in}v)}{\sum_{j \in C_n} \exp(X_{jn}\beta + F_{jn}v)} \text{ avec } v \sim N(0, I_M)$$

Un simulateur de type noyau logistique est calculé pour  $P_n(i)$  en remplaçant l'espérance mathématique de (20) par la moyenne empirique :

$$(21) \quad \tilde{P}_n(i) = \frac{1}{R} \sum_{r=1}^R P_n(i / v_r)$$

où  $v_r$  est le  $r$ -ième tirage de  $v$  à partir d'une loi normale  $N(0, I_M)$  et  $R$  est le nombre de tirages.

Le simulateur de type noyau est également sans biais et présente de bonnes propriétés asymptotiques. Cependant, contrairement à l'approche de Börsch-Supan et Hajivassiliou qui est fondée sur le probit classique, celle de Ben Akiva et Bolduc présente un avantage certain puisque le modèle probit avec le noyau logistique permet de réduire la dimension de l'intégrale et d'offrir une marge de liberté plus importante dans la spécification de la matrice  $F$  d'interdépendance des erreurs.

Ces dernières années, les méthodes d'estimation des modèles de type MNP ont fait de plus en plus appel aux méthodes d'échantillonnage qui utilisent des chaînes markoviennes. La plus populaire d'entre elles est l'échantillonnage de Gibbs, qui permet de simuler des intégrations impossibles à calculer sur le plan analytique. Ces méthodes, très utilisées dans les techniques d'estimation bayésienne, semblent donner des résultats encourageants dans le champ d'investigation très vaste ouvert par les modèles de choix discrets.

## 2.3 Tests de significativité statistique

### 2.3.1 Statistique de Student t

La statistique de Student est principalement utilisée pour tester si un paramètre particulier estimé dans le modèle est différent d'une valeur déterminée a priori, en général zéro. Son utilisation est la même qu'en régression linéaire classique. Cependant, pour le modèle non linéaire, il est valide seulement dans le cas des grands échantillons. On considère qu'une variable est significativement différente de zéro au seuil de 5% (resp. de 10%), si le  $t$  calculé qui lui est associé est supérieur à 1,96 (resp. de 1,65) en valeur absolue.

### 2.3.2 Test d'ajustement global

Dans les modèles de régression linéaire avec variable dépendante continue, il est usuel de tester l'hypothèse que les variables explicatives n'ont aucune influence sur les variations de la variable expliquée. Cette hypothèse revenant à tester la nullité globale des paramètres, on utilise alors un test de Fisher. Dans le cas des modèles estimés par maximum de vraisemblance, trois tests sont disponibles, fondés sur la détermination de la validité d'un ensemble de restrictions imposées au vecteur des paramètres. Il s'agit :

- du test de Wald : il est fondé sur les écarts entre les valeurs prises par le vecteur des paramètres estimés quand on impose et quand on n'impose pas les restrictions qu'on souhaite tester. Intuitivement, si le modèle respecte ces restrictions, leur prise en compte explicite lors de l'estimation ne devrait que peu modifier l'estimation des paramètres. On teste donc si la « distance » entre les vecteurs de paramètres estimés avec et sans restrictions est proche de zéro.
- du test du score : il est fondé sur la valeur estimée du vecteur des scores. Rappelons que, quand la log-vraisemblance est maximale, ce vecteur est nul. Si, dans le modèle non contraint (on n'impose pas explicitement les restrictions), on remplace les estimateurs de ce modèle par les estimateurs obtenus en imposant explicitement les restrictions, le vecteur des scores n'est plus nul. Toutefois, si le modèle respecte ces restrictions, le vecteur des scores reste proche de zéro. Le test du score est donc fondé sur une mesure de la « distance » entre le vecteur des scores et le vecteur nul. On montre également qu'il revient à tester la nullité du vecteur des multiplicateurs de Lagrange associé aux contraintes qui traduisent les restrictions testées. On sait en effet que, quand ces contraintes ne sont pas actives (ce qui est le cas quand le modèle les respecte), les multiplicateurs de Lagrange sont nuls.
- Du test du rapport de vraisemblance : ce dernier est fondé sur la comparaison des log-vraisemblances respectives du modèle non contraint (estimé en n'imposant pas explicitement les restrictions) et du modèle contraint (estimé en imposant explicitement les restrictions). Si le modèle respecte les restrictions, les imposer explicitement ne modifie que peu les estimations et la différence entre les deux log-vraisemblances est faible.

Dans nos applications empiriques, nous utiliserons essentiellement le test du rapport des vraisemblance, aisé à calculer quand, comme ce sera généralement le cas, on a estimé le modèle avec et sans les restrictions. La statistique du rapport de vraisemblance sur laquelle ce test est fondé, notée  $LR$ , s'écrit :

$$LR = 2(L(\hat{\beta}) - L(\tilde{\beta}))$$

où

- $L(\hat{\beta})$  est la log-vraisemblance avec tous les paramètres estimés sans restriction,
- $L(\tilde{\beta})$  est la log-vraisemblance quand tous les paramètres sont estimés en imposant les contraintes correspondant aux restrictions à tester.

La statistique  $LR$  suit un  $\chi^2(k)$  sous l'hypothèse nulle ( $k$  = nombre de variables explicatives).

### 2.3.3 Mesure de la qualité des estimations

Suivant la méthode du maximum de vraisemblance, nous savons que si le modèle estimé peut parfaitement prévoir le choix des individus dans l'échantillon, la fonction de vraisemblance vaudra 1. A l'extrême, si tous les paramètres estimés valent 0, le modèle n'apporte aucune contribution à l'explication des choix et la valeur de la fonction de vraisemblance est beaucoup plus faible. Ainsi, si l'on réalise plusieurs estimations pour les spécifications différentes, il sera utile de comparer la mesure de la qualité globale des estimations de celles-ci en comparant leurs vraisemblances. Une spécification avec une valeur de la vraisemblance plus élevée est considérée comme meilleure. Dans ce cas, on utilise l'indice du ratio de vraisemblance suivant :

$$\rho^2 = 1 - \frac{L(\hat{\beta})}{L(0)}$$

où

- $L(\hat{\beta})$  est le logarithme de la vraisemblance avec tous les paramètres estimés,
- $L(0)$  est le logarithme de la vraisemblance quand tous les paramètres sont nuls.

Cet indice est utilisé de la même manière que le  $R^2$  de l'analyse de la régression classique. Mais il n'est pas complètement similaire au  $R^2$ , qui compare un modèle dont la seule variable



explicative est la constante et le modèle complet. On procède donc à une modification de la définition de cet indice (McFadden, 1974) correspondant plus étroitement au  $R^2$  :

$$\rho^2 = 1 - \frac{L(\hat{\beta})}{L(C)}$$

Dans cette équation,  $L(C)$  est la valeur de la log-vraisemblance pour le modèle où tous les paramètres sont mis à zéro, sauf les constantes des alternatives. Comme  $R^2$ , la valeur de  $\rho^2$  est comprise entre 0 et 1, mais on ne peut pas dire quelle doit être la valeur optimale de  $\rho^2$ .

En général, comme dans le cas du  $R^2$ , quand on ajoute des variables dans le modèle, la valeur de  $\rho^2$  va augmenter ou au moins rester à la même valeur pour les mêmes données. C'est un désavantage de cet indice. Pour pallier à cette difficulté, on utilise les critères de Schwarz et d'Akaike. Ces critères d'information fournissent une mesure de la qualité de l'information donnée par le modèle.

### 2.3.4 Un test de la propriété IIA

La propriété IIA provient de l'hypothèse d'indépendance (et d'homoscédasticité) des termes d'erreur entre les différentes modalités. Par conséquent, cette propriété est mise en défaut si le rapport des probabilités  $p_{ij} / p_{ik}$  n'est pas indépendant des autres modalités  $l, l \neq j, k$ . Une façon simple de tester la propriété IIA est alors d'estimer le modèle en restreignant l'ensemble des choix, et de comparer les paramètres obtenus avec ceux du modèle complet. Si la propriété IIA est valide, inclure ou exclure des modalités tierces ne devrait pas modifier de façon significative les paramètres estimés. Si en revanche les paramètres sont sensiblement différents, le rapport des probabilités dépendra des autres modalités et la propriété sera rejetée. La solution consistera alors à rechercher dans une autre spécification du modèle ou dans une modification de la typologie des choix.

Le test proposé (Hausman et McFadden (1984)) est basé sur la statistique de test de Hausman (1978), comparant un estimateur convergent, mais non efficace, à un estimateur convergent (et efficace) seulement sous l'hypothèse nulle. Dans notre cas, les paramètres estimés du modèle complet, notés  $\hat{\beta}_c$ , seront convergents et efficaces sous l'hypothèse nulle  $H_0$  : sinon, la propriété IIA est valide, et non convergents. Les estimateurs des paramètres du modèle

restreint, notés  $\hat{\beta}$ , sont non efficaces<sup>10</sup>. Par conséquent, la différence entre les matrices de variances-covariances de  $\hat{\beta}$  et  $\hat{\beta}_c$  sera une matrice semi-définie positive. La statistique de test est :

$$q = (\hat{\beta} - \hat{\beta}_c)' [Var(\hat{\beta}) - Var(\hat{\beta}_c)]^{-1} (\hat{\beta} - \hat{\beta}_c)$$

qui suit un  $\chi^2$  à  $k$  degrés de liberté, où  $k$  est la dimension du vecteur de paramètres.

## 2.4 Interprétation des modèles

L'objectif majeur de la modélisation est de fournir un outil pour l'analyse socio-économique. La réalisation de cet objectif dépend de l'interprétation des résultats des modèles. Cette difficulté est rarement prise en compte par le sociologue ou l'économiste. Dans cette étude, on utilise principalement les méthodes suivantes d'interprétation des paramètres : calcul des utilités marginales, calcul des effets marginaux sur les probabilités de choix, des élasticités et de la valeur du temps.

### 2.4.1 Calcul des utilités marginales :

Considérons la composante déterministe décrite par (1c)

$$(1c) V_{in} = X_{in} \beta = \sum_{k=1}^K X_{ink} \beta_k$$

Normalement, avec un modèle de régression linéaire classique, le calcul de l'utilité marginale est simple et aisément interprétable. On peut dire qu'une augmentation ou une diminution de la variable explicative  $X_{ink}$  d'une unité conduit à  $\beta_k$  unités d'augmentation ou de diminution de la fonction d'utilité. Cependant, cette interprétation ne sert à rien pour le modèle de choix discret car l'utilité ici n'est pas directement interprétable, puisqu'elle est considérée au départ comme une variable latente. L'analyse doit porter sur les probabilités de choix observables.

---

<sup>10</sup> Cette perte d'efficacité provient de ce que la variance de l'estimateur augmente du fait de la perte de l'information occasionnée par l'élimination de certaines modalités.

Dans ce cas, il est préférable d'interpréter les effets correspondant à une valeur estimée de  $\beta_k$  sur une transformation de l'utilité et non sur celle-ci directement. Pour le modèle logit binaire, caractérisée par deux modalités 1 ou 0, la forme de l'utilité transformée est donnée par l'expression :

$$\exp(X_{1n}\beta) = \frac{P_n(1)}{1 - P_n(1)}$$

Les effets des variables explicatives, ainsi que la transformation de l'utilité marginale apparaissent sous la forme de ratios de probabilités de choix. En conséquence, s'il y a changement d'une unité des variables explicatives, on peut connaître le ratio des probabilités avant et après ce changement. L'interprétation devient alors intuitive. Ce type d'interprétation peut être aussi appliqué aux variables muettes. Dans ce cas, une unité de changement des variables explicatives indique la transition d'une situation à une autre. Un ratio de probabilité supérieur à 1 indique qu'il y a plus de chance de réalisation pour l'événement présenté que pour l'événement non présenté.

Pour le modèle probit, parce qu'il n'existe pas de moyen simple de transformer la fonction d'utilité, l'interprétation des effets marginaux sur l'utilité est difficile et conduit à l'hypothèse contraignante de linéarité et d'additivité des effets des variables sur la fonction de distribution normale standard cumulative.

### 2.4.2 Calcul des probabilités marginales

En plus de l'analyse des effets marginaux d'une variable sur l'utilité transformée, on peut aussi considérer les effets marginaux des variables sur les probabilités de choix, ce qui peut s'avérer très utile. Généralement les effets marginaux sont mesurés par les dérivées des probabilités par rapport aux variables explicatives. Dans le cas du modèle logit, il est facile de prouver que :

$$\frac{\partial P_n(i)}{\partial X_{ink}} = P_n(i)(1 - P_n(i))\beta_k$$

A la différence de l'interprétation des effets sur l'utilité transformée, qui sont les mêmes pour toutes les valeurs des variables indépendantes, les effets marginaux sur la probabilité de choix changent avec les valeurs des variables explicatives  $X_{ink}$  et donc les probabilités qui leur sont associées. Pour les calculer, on doit tout d'abord choisir un niveau pour chaque variable. En général, pour les variables que l'on n'a pas choisi d'analyser, on prendra les valeurs moyennes.

Une des difficultés de la dérivée est qu'elle n'est définie que pour des variables continues. Pour les variables discrètes comme les variables muettes, les traiter comme si elles étaient continues en dérivant aboutit à une mauvaise approximation des effets marginaux. Une meilleure estimation consiste à calculer la différence de probabilités prévues conditionnelles entre deux modalités de la variable discrète ou de la variable muette.

### 2.4.3 Calcul des élasticités

Un autre moyen d'interpréter les modèles de choix discrets est de recourir au concept d'élasticité. Cette dernière mesure l'ampleur relative de la réponse de la probabilité de choix au changement marginal de la variable explicative. Pour le modèle logit, l'élasticité directe est donnée par l'expression suivante :

$$E_{X_{ink}}^{P_n(i)} = \frac{\partial P_n(i)}{\partial X_{ink}} \frac{X_{ik}}{P(i)} = \frac{\partial \ln P_n(i)}{\partial \ln X_{ink}} = [1 - P_n(i)] X_{ink} \beta_k$$

En présence d'une variable spécifique à chaque alternative dans le modèle, un changement de cette variable va influencer non seulement la fonction qui l'inclut mais aussi les autres fonctions d'utilité. Ainsi, pour le modèle logit, l'élasticité croisée de la probabilité de l'alternative  $i$  par rapport à une variable relative à l'alternative  $j$  est donnée par :

$$E_{X_{jnk}}^{P(i)} = \frac{\partial \ln P_n(i)}{\partial \ln X_{jnk}} = -P_n(j) X_{jnk} \beta_k$$

#### **2.4.4 Calcul de la valeur du temps**

En transport de voyageurs, à l'aide des modèles de choix discret, un autre objectif important est d'interpréter comment les voyageurs évaluent les valeurs monétaires des gains de temps par les coefficients des variables. La valeur du temps, qui est mesurée en utilisant le ratio entre les coefficients du temps et du coût, est un de ces types d'interprétation de résultats du modèle.

### **2.5 Conclusion**

Nous avons recensé dans ce chapitre les modèles que nous pouvons envisagé dans la modélisation du choix modal longue distance. La rareté des études sur ce champ d'investigation nous a amené à tester les différentes modèles économétriques. C'est-à-dire, d'une part sur la nature de la forme fonctionnel de la fonction d'utilité (linéarité versus non-linéarité), et d'autre part sur le choix de la méthode d'estimation (logit, logit conditionnel, le logit emboîté, ...).

Le choix définitif sera fixé lors de l'étude empirique que nous réaliserons dans le chapitre 4.

## CONCLUSION DE LA PREMIERE PARTIE

L'étude des modèles issus de la théorie microéconomique de l'affectation des ressources monétaires et temporelles, nous ont amené à privilégier les modèles qui découlent de l'analyse de De Serpa (1971). En effet, ceux-ci répondent très bien à des problématiques de déplacement interurbain et offrent une possibilité d'étude complète sur la nature de la fonction de la valeur du temps.

De plus Bates et Robert (1986) appliquent la problématique du choix modal à ce modèle. Il obtiennent une fonction d'utilité indirecte qui a le grand avantage d'être opérationnel sur le plan économétrique. Des extensions de cette fonction d'utilité indirecte ont été réalisés par Truong et Hensher en 1985 puis par Causse en 1999. La première montre que la valeur du temps est fonction à la fois du temps de déplacement et de son prix. La seconde aboutit à une fonction de la valeur du temps qui dépend en plus du temps de déplacement et de son prix, du revenu de l'individu. D'une manière générale, il y a donc un arbitrage à faire entre fonction d'utilité indirecte linéaire et fonction d'utilité indirecte non-linéaire.

La méthodologie économétrique retenue est celle de la théorie des choix discrets. La rareté des études empiriques sur le choix modal longue distance en France nous a amené à nous interroger sur toutes les conditions d'utilisations de l'usage des modèles probabilistes : le choix de la forme fonctionnelle pour l'utilité représentative, le choix des variables explicatives, le choix de la méthode d'estimation, le choix de la segmentation et de la méthode d'agrégation.

Dans la deuxième partie nous tenterons de répondre aux interrogations soulevées dans les deux premiers chapitres. Une évaluation empirique permettra d'y répondre en utilisant les données de l'enquête transport.

## **DEUXIEME PARTIE**

### **UNE APPLICATION DU CHOIX MODAL DE TRANSPORT SUR LA LONGUE DISTANCE**

# INTRODUCTION

Cette seconde partie présente les résultats de la modélisation du choix modal et de l'évaluation de la valeur du temps sur les déplacements de la longue distance (déplacement supérieur à 100 km).

Pour effectuer cet exercice nous avons utilisé les données de l'enquête transport de 1993-94. L'objectif de cette enquête est d'avoir une connaissance de la mobilité des ménages, de leur usage des moyens de transports collectifs et des moyens de transports individuels. Ainsi cette enquête s'intéresse à tous les déplacements, quels que soient les motifs, les modes de transport, la période de l'année ou le moment de la journée. Elle s'intéresse aussi, pour comprendre ces comportements, aux possibilités d'accès aux transports collectifs et aux moyens de transports individuels dont disposent les ménages. Une faiblesse de cette enquête est de ne pas être capable de nous renseigner sur les modes concurrents. Or dans une optique de modélisation du choix modal du voyageur, l'usager choisira le mode de transport qui lui assure le niveau d'utilité maximal. Pour réaliser ce choix, il a besoin de connaître parfaitement l'utilité associée à chacun des modes de transport. Il faut alors pour cela caractériser l'offre de transport.

Le coût et le temps de déplacement caractérisent généralement l'offre de transport. Dans le premier chapitre (chapitre 3) nous construisons la base d'offre. Pour réaliser cette base nous avons construit un zonage sur la base duquel sont sélectionnés les déplacements figurant dans l'échantillon de l'enquête, puis nous décrivons d'une manière précise la construction des variables d'offre nécessaires à la modélisation du choix modal.

Ensuite dans un deuxième chapitre (chapitre 4), nous ferons une confrontation exhaustive des différentes méthodes d'estimations du modèle de choix modal voyageur. Nous répondrons aux questions suivantes :



- quelle est la nature de la fonction d'utilité, ou plus exactement faut-il une spécification linéaire ou non-linéaire ?
- quel modèle économétrique offre à la fois un très bon pouvoir explicatif et qualité prédictive très importante ?
- parmi les différentes techniques d'agrégation, laquelle faut-il retenir pour procéder ensuite à des simulations du choix modal en fonction de variables socio-économiques ?

Enfin dans un dernier chapitre, une étude très approfondie sur le choix de la forme fonctionnelle de la valeur du temps sera réalisée. Nous partirons des constats théoriques mis en évidence dans le premier chapitre de la 1<sup>ère</sup> partie. En ayant recours à des tests économétriques nous pourrons trancher sur cette interrogation. L'intégration de cette fonction de valeur du temps dans un modèle de choix modal voyageur nous permettra une évaluation de celle-ci sur la longue distance.

# **CHAPITRE 3**

## **LE CHOIX D'UN ECHANTILLON ET LA CONSTRUCTION D'UNE BASE D'OFFRE**

La constitution de la donne (cette terminologie est proposée par A. Bonnafous (1989)) est un élément central de tout travail de modélisation. En effet, celle-ci se doit d'être cohérente avec le modèle a priori et en permettre la construction. La constitution de la donne et la construction du modèle sont donc interdépendantes. Le modèle final résulte d'un équilibre obtenu à la suite d'un processus itératif entre les deux, équilibre fonction de la problématique du modèle.

Dans une optique de modélisation du choix modal du voyageur, l'utilisateur choisira le mode de transport qui lui assure un niveau d'utilité maximal. Pour réaliser ce choix, il a besoin de connaître parfaitement l'utilité associée à chacun des modes de transport. Il faut donc définir les temps et coût de transport qui constitueront une partie importante de la donne. On se doit alors de caractériser l'offre modale pour pouvoir déterminer, par une approche économétrique, de quelle manière ces caractéristiques déterminent le choix modal.

Nous ferons nos estimations en utilisant les données de l'enquête transport (cf. annexe 2). Celle-ci décrit plus de 34 000 déplacements longue distance avec environ 28 800 couples origine-destination (OD) distincts. L'idéal serait d'exploiter l'ensemble de ces déplacements (voiture, train et avion) mais il faudrait coder le temps et le coût de déplacement<sup>11</sup> pour chacun des modes de transport et sur chacune des OL décrites par l'enquête. Nous rencontrerions alors des difficultés non négligeables pour des couples origine-destination peu fréquentés. De ce fait, un travail exhaustif n'est pas envisageable, du moins dans des délais

---

<sup>11</sup> Le temps de parcours est disponible dans l'enquête transport uniquement pour le mode utilisé par l'enquête. On se voit donc dans l'obligation de construire le temps de déplacement pour les modes alternatifs. Concernant le coût de déplacement, cette variable n'est pas disponible du tout dans l'enquête. Elle doit être créée pour tous les modes de transport.

raisonnables. Nous sommes donc dans l'obligation de réduire le nombre d'observations de l'échantillon.

Deux parties constituent ce chapitre : la première présente la démarche suivie pour la construction d'un zonage sur la base duquel sont sélectionnés les déplacements figurant dans l'échantillon. La seconde partie décrit d'une manière précise la construction des variables d'offres nécessaires à la modélisation du choix modal.

## **3.1 Construction de l'échantillon et statistiques descriptives**

### **3.1.1 Construction de l'échantillon**

Le préalable à toute construction de l'offre reste la détermination des zones spatiales sur lesquelles porteront les informations. Nous avons décidé de travailler au niveau des zones d'emploi pour la construction de l'échantillon en sélectionnant celles qui sont localisées sur les quatre axes disposant d'une desserte TGV :

- l'axe Ile-de-France Nord-Pas-de-Calais (axe Nord),
- l'axe Ile-de-France Lyon-Marseille (axe Sud-Est),
- l'axe Ile-de-France Rennes-Brest/Quimper (axe Ouest),
- l'axe Ile-de-France Bordeaux –Toulouse/Pays Basque (axe Sud-Ouest).



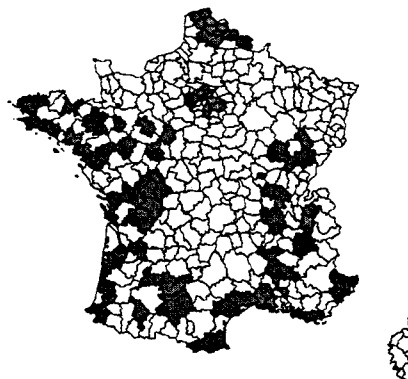
Trois raisons expliquent le choix des axes TGV :

- 1- Ces axes sont ceux qui connaissent les volumes de déplacement les plus importants. De ce fait, un même codage permet de couvrir un nombre plus élevé de déplacements ;
- 2- Dans la plupart des cas, les localités desservies par ces axes disposent d'une bonne offre de transport ;
- 3- Sur ces axes, le codage de l'offre de transport (coût et temps) est le plus aisé.

Nous avons procédé en trois étapes pour constituer l'échantillon retenu pour l'analyse du choix modal longue distance :

La première étape consiste à déterminer l'ensemble des communes appartenant à des zones d'emploi dont la commune centre est directement desservie par une gare TGV située sur l'un de ces axes (carte n°3.1). On sélectionne ainsi 5475 déplacements reliant des zones appartenant à un même axe, soit un peu plus de 1000 déplacements par axe, qui demeure insuffisant. De plus, les déplacements en avion sont peu représentés.

Carte n° 3.1

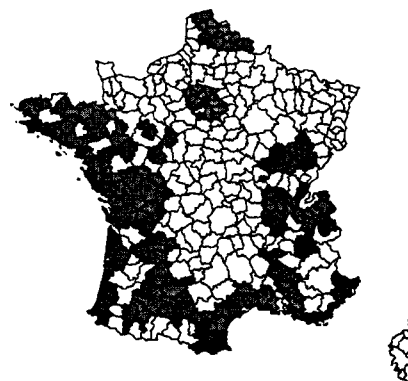


étape n°1

|                          | Effectif |
|--------------------------|----------|
| nombre de communes       | 1098     |
| nombre de zones d'emploi | 77       |
| nombre d'individus       | 1815     |
| nombre de déplacements   | 5475     |

Ensuite, aux zones d'emploi ci-dessus, on rajoute les autres zones dans lesquelles se situe l'origine et/ou la destination de déplacements par avion ou TGV sur les différents axes. Puis, on recense l'ensemble des aéroports à proximité des zones sélectionnées, ainsi que leurs aires d'influence<sup>12</sup> et on les affecte aux axes (carte n°3.2). Cette deuxième étape nous permet de presque doubler le nombre de déplacements.

Carte n° 3.2



étape n°2

|                          | Effectif |
|--------------------------|----------|
| nombre de communes       | 1745     |
| nombre de zones d'emploi | 129      |
| nombre d'individus       | 2811     |
| nombre de déplacements   | 9448     |

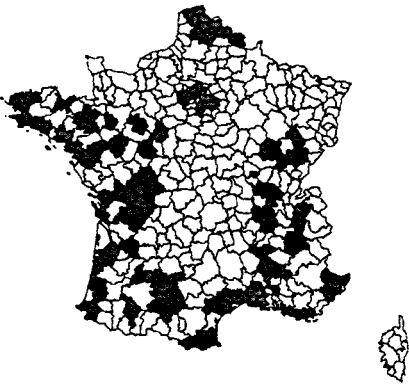
<sup>12</sup> Ce travail a été réalisé par Gilles Dumartin au sein de la Direction des Routes au Ministère de l'Équipement, des Transports et du Logement.

La première étape consiste à déterminer l'ensemble des communes appartenant à des zones d'emploi dont la commune centre est directement desservie par une gare TGV située sur l'un de ces axes (carte n°3.1). On sélectionne ainsi 5475 déplacements reliant des zones appartenant à un même axe, soit un peu plus de 1000 déplacements par axe, qui demeure insuffisant. De plus, les déplacements en avion sont peu représentés.

étape n°1

|                          | Effectif |
|--------------------------|----------|
| nombre de communes       | 1098     |
| nombre de zones d'emploi | 77       |
| nombre d'individus       | 1815     |
| nombre de déplacements   | 5475     |

Carte n° 3.1

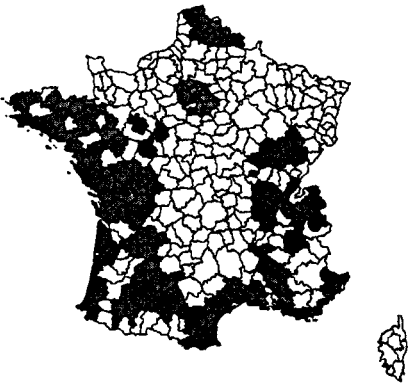


Ensuite, aux zones d'emploi ci-dessus, on rajoute les autres zones dans lesquelles se situe l'origine et/ou la destination de déplacements par avion ou TGV sur les différents axes. Puis, on recense l'ensemble des aéroports à proximité des zones sélectionnées, ainsi que leurs aires d'influence<sup>12</sup> et on les affecte aux axes (carte n°3.2). Cette deuxième étape nous permet de presque doubler le nombre de déplacements.

étape n°2

|                          | Effectif |
|--------------------------|----------|
| nombre de communes       | 1745     |
| nombre de zones d'emploi | 129      |
| nombre d'individus       | 2811     |
| nombre de déplacements   | 9448     |

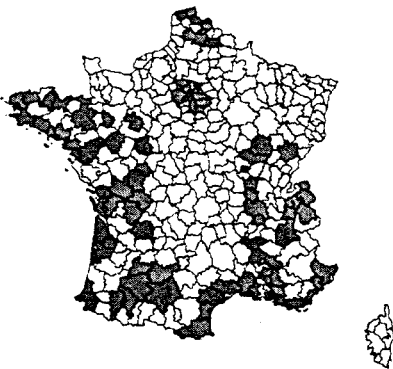
Carte n° 3.2



<sup>12</sup> Ce travail a été réalisé par Gilles Dumartin au sein de la Direction des Routes au Ministère de l'Équipement, des Transports et du Logement.

Afin d'éviter de multiplier les zones générant ou recevant très peu de déplacements, nous éliminons les relations pour lesquelles le volume de déplacements train + avion est inférieur au plus petit volume train + avion constaté à l'issue de la première étape (carte n°3.3).

Carte n° 3.3



étape n°3

|                          | effectif |
|--------------------------|----------|
| Nombre de communes       | 1431     |
| Nombre de zones d'emploi | 93       |
| Nombre d'individus       | 2372     |
| Nombre de déplacements   | 7747     |

Finalement, nous obtenons un échantillon de 7 747 déplacements réalisés par 2 327 individus. Le tableau suivant (tableau 3.1) montre comment le volume des déplacements sur chacun des modes évolue d'une étape à l'autre.

Tableau n° 3.1: Répartition modale aux différentes étapes de sélection de l'échantillon

|         | Voiture  |             | Train    |             | Avion    |             | Total |
|---------|----------|-------------|----------|-------------|----------|-------------|-------|
|         | Effectif | Pourcentage | effectif | Pourcentage | Effectif | Pourcentage |       |
| étape 1 | 4453     | 77,5%       | 1073     | 18,7%       | 219      | 3,8%        | 5475  |
| étape 2 | 7663     | 81,1%       | 1420     | 15,4%       | 329      | 3,5%        | 9448  |
| étape 3 | 6060     | 78,2%       | 1358     | 17,6%       | 329      | 4,2%        | 7747  |

### 3.1.2 Statistiques descriptives

#### 3.1.2.1 Les individus

Comme le fait apparaître le tableau n°3.2, il n'y a pas de divergence de structure majeure entre l'échantillon ainsi constitué et l'ensemble de la population enquêtée. Par âge, on remarque surtout une moindre proportion dans l'échantillon des tranches les plus âgées au bénéfice des 20-39 ans. Par profession et catégorie socio-professionnelle, on observe une présence plus marquée des cadres, des professions supérieures et des professions intermédiaires, au détriment des ouvriers et des agriculteurs. Cette différence est à relier au mode de sélection des zones, qui privilégie les aires les plus urbaines. Par taille de ménage,

les différences sont mineures. Par niveau d'équipement automobile, on constate une proportion plus importante de ménages multimotorisés, sans doute à relier au phénomène constaté ci-dessus concernant les PCS les plus élevées.

Tableau n° 3.2 : Caractéristiques démographiques de l'échantillon

|                                         | Echantillon de l'enquête transport |            | Enquête transport complète |            |
|-----------------------------------------|------------------------------------|------------|----------------------------|------------|
|                                         | Effectifs                          | Fréquences | Effectifs                  | Fréquences |
| <b>Sexe</b>                             |                                    |            |                            |            |
| <i>Masculin</i>                         | 1268                               | 54%        | 6958                       | 49%        |
| <i>Féminin</i>                          | 1059                               | 46%        | 7249                       | 51%        |
| <b>Age</b>                              |                                    |            |                            |            |
| <i>- de 19 ans</i>                      | 234                                | 10%        | 1689                       | 12%        |
| <i>20-39 ans</i>                        | 920                                | 40%        | 4541                       | 32%        |
| <i>40-59 ans</i>                        | 783                                | 34%        | 4253                       | 30%        |
| <i>60-74 ans</i>                        | 326                                | 14%        | 2665                       | 19%        |
| <i>+ de 75 ans</i>                      | 62                                 | 3%         | 1036                       | 7%         |
| <i>Non déclaré</i>                      | 2                                  | 0%         | 23                         | 0%         |
| <b>PCS</b>                              |                                    |            |                            |            |
| <i>Agriculteurs</i>                     | 44                                 | 2%         | 746                        | 6%         |
| <i>Artisans commerçants et chef</i>     | 134                                | 6%         | 1003                       | 8%         |
| <i>D entreprise</i>                     |                                    |            |                            |            |
| <i>Cadres et professions supérieurs</i> | 514                                | 23%        | 1512                       | 12%        |
| <i>Professions intermédiaires</i>       | 534                                | 24%        | 2305                       | 18%        |
| <i>Employés</i>                         | 482                                | 22%        | 3244                       | 25%        |
| <i>Ouvriers qualifiés</i>               | 182                                | 8%         | 1793                       | 14%        |
| <i>Ouvriers non qualifiés</i>           | 61                                 | 3%         | 1161                       | 9%         |
| <i>Non déclaré</i>                      | 240                                | 11%        | 1372                       | 10%        |
| <i>Données manquantes</i>               | 136                                |            | 1071                       |            |
| <b>Taille du ménage</b>                 |                                    |            |                            |            |
| <i>1 personne</i>                       | 444                                | 19%        | 2967                       | 21%        |
| <i>2 personnes</i>                      | 726                                | 31%        | 4438                       | 31%        |
| <i>3 personnes</i>                      | 476                                | 20%        | 2768                       | 19%        |
| <i>4 personnes</i>                      | 450                                | 19%        | 2541                       | 18%        |
| <i>+ de 5 personnes</i>                 | 231                                | 10%        | 1493                       | 11%        |
| <b>Nombre de véhicules</b>              |                                    |            |                            |            |
| <i>Aucun véhicule</i>                   | 231                                | 10%        | 2649                       | 19%        |
| <i>1 véhicule</i>                       | 1075                               | 46%        | 6585                       | 46%        |
| <i>2 véhicules</i>                      | 871                                | 37%        | 4305                       | 30%        |
| <i>3 véhicules</i>                      | 150                                | 6%         | 668                        | 5%         |

Le tableau n°3.3 décrit le type de cartes de réduction sur les transports collectifs détenues par les ménages et/ou les individus. Nous observons qu'un tiers des individus possède une carte de réduction sur un réseau de transport collectif et qu'une fois sur deux celle-ci n'est valable que sur le réseau SNCF. On ne pourra exploiter cette variable que lorsque l'information existera. Dans les autres cas, nous supposerons que l'individu ne possède pas de carte et n'a

donc pas accès à une réduction (ce qui suppose que le choix de demande ou non d'une carte n'est pas directement lié au choix modal).

Tableau n° 3.3 : Type de cartes et type de réseaux utilisés par l'individu.

|                                                  | Echantillon de l'enquête transport |            | Enquête transport complète |            |
|--------------------------------------------------|------------------------------------|------------|----------------------------|------------|
|                                                  | effectifs                          | Fréquences | Effectifs                  | fréquences |
| <i>ne possède pas de carte</i>                   | 1605                               | 69,0%      | 10962                      | 77,2%      |
| <i>Possède une carte</i>                         | 722                                | 31,0%      | 3245                       | 22,8%      |
| <i>Total</i>                                     | 2327                               | 100%       | 14207                      | 100%       |
| <b>Types de cartes</b>                           |                                    |            |                            |            |
| <i>Carte gratuite</i>                            | 82                                 | 11,4%      | 467                        | 14,4%      |
| <i>Carte militaire</i>                           | 24                                 | 3,3%       | 88                         | 2,7%       |
| <i>Carte famille nombreuse</i>                   | 120                                | 16,6%      | 467                        | 14,4%      |
| <i>Autres carte perso. et perm. de réduction</i> | 33                                 | 4,6%       | 218                        | 6,7%       |
| <i>Carte de libre circulation</i>                | 186                                | 25,8%      | 639                        | 19,7%      |
| <i>Carte abonnement scolaire</i>                 | 38                                 | 5,3%       | 328                        | 10,1%      |
| <i>Carte abonnement étudiant</i>                 | 25                                 | 3,5%       | 116                        | 3,6%       |
| <i>Carte abonnement dom-travail</i>              | 17                                 | 2,4%       | 63                         | 1,9%       |
| <i>Carte modulo pass</i>                         | 16                                 | 2,2%       | 54                         | 1,7%       |
| <i>Autre carte abonnement, libre circulation</i> | 12                                 | 1,7%       | 67                         | 2,1%       |
| <i>Sur une destination</i>                       | 7                                  | 1,0%       | 26                         | 0,8%       |
| <i>Carte carrissimo, carte jeune</i>             | 12                                 | 1,7%       | 33                         | 1,0%       |
| <i>Carte vermeil</i>                             | 88                                 | 12,2%      | 412                        | 12,7%      |
| <i>Carte couple</i>                              | 15                                 | 2,1%       | 56                         | 1,7%       |
| <i>Autre carte</i>                               | 31                                 | 4,3%       | 135                        | 4,2%       |
| <i>Autre</i>                                     | 15                                 | 2,1%       | 71                         | 2,2%       |
| <i>Non déclaré</i>                               | 1                                  | 0,1%       | 5                          | 0,2%       |
| <b>Total</b>                                     | 722                                | 100%       | 3245                       | 100%       |
| <b>Réseau de validité de la carte</b>            |                                    |            |                            |            |
| <i>Réseau urbain ,suburbain</i>                  | 221                                | 30,6%      | 1059                       | 32,6%      |
| <i>Cars interurbains, ruraux</i>                 | 32                                 | 4,4%       | 289                        | 8,9%       |
| <i>SNCF</i>                                      | 326                                | 45,2%      | 1352                       | 41,7%      |
| <i>SNCF+réseau urbain</i>                        | 98                                 | 13,6%      | 386                        | 11,9%      |
| <i>Réseau urbain + cars interurbains</i>         | 3                                  | 0,4%       | 47                         | 1,4%       |
| <i>Réseau aérien</i>                             | 34                                 | 4,7%       | 69                         | 2,1%       |
| <i>Non déclaré</i>                               | 8                                  | 1,1%       | 42                         | 1,3%       |
| <b>Total</b>                                     | 722                                | 100%       | 3245                       | 100%       |

3.1.2.2 Les déplacements

Les parts modales observées sur l'échantillon analysé (tableau n°3.4) sont les suivantes : 78,2% pour la voiture, 17,6% pour le train et 4,2% pour l'avion.



On observe pour le mode train qu'il existe une prédominance du TGV (11,8%) par rapport au train classique (5,4%). Le zonage effectué sur les axes TGV en est évidemment responsable. Les déplacements utilisant la voiture sont le plus souvent effectués en tant que conducteur avec passager (28,3%) ou en tant que passager (28%).

Tableau n° 3.4 : parts modales

| mode de transport          | Effectifs   | Fréquences   |
|----------------------------|-------------|--------------|
| <b>Voiture</b>             | <b>6060</b> | <b>78,2%</b> |
| 3 ou 4 roues               | 11          | 0,1%         |
| Conducteur avec passager   | 2191        | 28,3%        |
| Conducteur seul            | 1409        | 18,2%        |
| Passager                   | 2171        | 28,0%        |
| Tantôt pass, tantôt conduc | 278         | 3,6%         |
| <b>Train</b>               | <b>1358</b> | <b>17,6%</b> |
| autre train 1cl            | 48          | 0,6%         |
| autre train 2cl            | 383         | 4,9%         |
| tgV 2cl                    | 726         | 9,4%         |
| tvG 1cl                    | 185         | 2,4%         |
| train sans prec            | 16          | 0,2%         |
| <b>Avion</b>               | <b>329</b>  | <b>4,2%</b>  |
| <b>Total</b>               | <b>7747</b> | <b>100%</b>  |

Sur la longue distance, l'usage de plusieurs moyens de transport est chose courante. Le chaînage modal ne doit donc pas être négligé. Le fait qu'une très grande partie des déplacements s'effectue avec une succession de plusieurs modes de transport influencera la modélisation du partage modal.

Dans le tableau 3.5, nous avons pris en compte quatre modes de transport pour le traitement du chaînage modal : le train, la voiture, l'avion et les autres modes (taxi, transport collectif, bus, etc, ...). A quelques exceptions près, il n'y a pas de chaînage modal quand la voiture est le mode principal. A l'opposé, le train et l'avion nécessitent presque toujours un chaînage modal. Dans la plupart des cas, les modes de transport autres que le train, l'avion ou la voiture (car, taxi, transport urbain) sont une des composantes du chaînage.

Tableau n° 3.5 : le chaînage modal

| Chaînage                 | Effectif    | Pourcentage  |
|--------------------------|-------------|--------------|
| <b>Avion</b>             | <b>329</b>  | <b>4,2%</b>  |
| Avion                    | 29          | 0,4%         |
| Avion-autre mode         | 15          | 0,2%         |
| Avion-train              | 18          | 0,2%         |
| Train-avion              | 13          | 0,2%         |
| Autre mode-avion         | 13          | 0,3%         |
| Autre mode-avion-voiture | 44          | 0,6%         |
| Voiture-avion            | 34          | 0,4%         |
| Voiture-avion-autre mode | 59          | 0,8%         |
| Voiture-avion-voiture    | 94          | 1,2%         |
| <b>Train</b>             | <b>1358</b> | <b>17,6%</b> |
| Train                    | 149         | 2,0%         |
| Autre mode-train         | 240         | 3,2%         |
| Train-autre mode         | 108         | 1,4%         |
| Train-train              | 90          | 1,2%         |
| Train-train-voiture      | 11          | 0,1%         |
| Train-voiture            | 272         | 3,6%         |
| Voiture-train            | 145         | 1,9%         |
| Voiture-train-autre mode | 185         | 2,4%         |
| Voiture-train-train      | 22          | 0,3%         |
| Voiture-train-voiture    | 106         | 1,4%         |
| <b>Voiture</b>           | <b>6060</b> | <b>78,2%</b> |
| Voiture                  | 5854        | 77,3%        |
| Voiture-autre mode       | 2           | 0,03%        |
| Autre mode-voiture       | 3           | 0,0%         |
| Voiture-voiture          | 49          | 0,7%         |
| <b>Total</b>             | <b>7747</b> | <b>100%</b>  |

L'avion est proportionnellement plus utilisé que les autres modes par les hommes (64% contre 57,6% en moyenne, cf. tableau n°3.6). Les répartitions par âge font apparaître une préférence des 20-39 ans pour les modes train et avion. Les plus de 75 ans privilégient quant à eux le mode ferroviaire.

Tableau n°3.6 : répartition des déplacements par mode selon le sexe et l'âge du voyageur

|             | tous modes confondus |            | Voiture   |            | Train     |            | avion     |            |
|-------------|----------------------|------------|-----------|------------|-----------|------------|-----------|------------|
|             | Effectifs            | Fréquences | Effectifs | Fréquences | Effectifs | Fréquences | Effectifs | fréquences |
| <b>Sexe</b> |                      |            |           |            |           |            |           |            |
| Masculin    | 4459                 | 57,6%      | 3497      | 57,7%      | 751       | 55,3%      | 211       | 64,1%      |
| Féminin     | 3288                 | 42,4%      | 2563      | 42,3%      | 607       | 44,7%      | 118       | 35,9%      |
| Total       | 7747                 | 100%       | 6060      | 100%       | 1358      | 100%       | 329       | 100%       |
| <b>Age</b>  |                      |            |           |            |           |            |           |            |
| - de 19 ans | 653                  | 8,4%       | 516       | 8,5%       | 112       | 8,2%       | 25        | 7,6%       |
| 20-39 ans   | 3209                 | 41,4%      | 2410      | 39,8%      | 651       | 47,9%      | 148       | 45,0%      |
| 40-59 ans   | 2787                 | 36,0%      | 2272      | 37,5%      | 387       | 28,5%      | 128       | 38,9%      |
| 60-74 ans   | 946                  | 12,2%      | 774       | 12,8%      | 148       | 10,9%      | 24        | 7,3%       |
| + de 75 ans | 145                  | 1,9%       | 87        | 1,4%       | 54        | 4,0%       | 4         | 1,2%       |
| Non déclaré | 7                    | 0,1%       | 1         | 0,0%       | 6         | 0,4%       |           | 0,0%       |
| Total       | 7747                 | 100%       | 6060      | 100%       | 1358      | 100%       | 329       | 100%       |

La répartition des motifs est très différente selon le mode de transport utilisé (cf. tableau n°3.7). Les usagers de l'avion voyagent plus que les autres pour des raisons professionnelles. Pour le train et la voiture, c'est le motif visite qui représente la part la plus importante des motifs de déplacements.

On constate une opposition très nette entre le mode de transport privé (voiture) et les modes de transport collectifs (train et avion) en ce qui concerne la taille du groupe qui se déplace. En effet, les transports collectifs représentent deux tiers des déplacements individuels, le transport privé, un tiers.

Tableau n°3.7 : répartition des déplacements par mode selon le motif et la taille du groupe se déplaçant

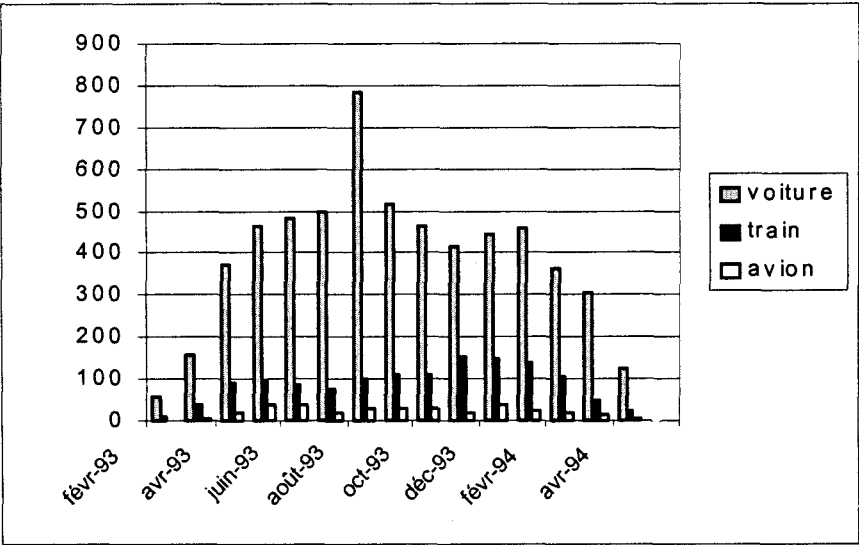
|                           | Tous modes confondus |            | voiture   |            | Train     |            | Avion     |            |
|---------------------------|----------------------|------------|-----------|------------|-----------|------------|-----------|------------|
|                           | Effectifs            | Fréquences | Effectifs | fréquences | effectifs | Fréquences | effectifs | fréquences |
| <b>Motif</b>              |                      |            |           |            |           |            |           |            |
| Dom-trav, études, profess | 1598                 | 20,6%      | 1056      | 17,4%      | 394       | 29,0%      | 148       | 45,0%      |
| Loisirs                   | 856                  | 11,0%      | 740       | 12,2%      | 94        | 6,9%       | 22        | 6,7%       |
| Vacances                  | 1200                 | 15,5%      | 1012      | 16,7%      | 146       | 10,8%      | 42        | 12,8%      |
| Visite                    | 2754                 | 35,5%      | 2138      | 35,3%      | 535       | 39,4%      | 81        | 24,6%      |
| Autres motifs             | 1306                 | 16,9%      | 1090      | 18,0%      | 180       | 13,3%      | 36        | 10,9%      |
| Non déclaré               | 33                   | 0,4%       | 24        | 0,4%       | 9         | 0,7%       |           | 0,0%       |
| Total                     | 7747                 | 100%       | 6060      | 100%       | 1358      | 100%       | 329       | 100%       |
| <b>Taille</b>             |                      |            |           |            |           |            |           |            |
| 1 personne                | 3333                 | 43,0%      | 2180      | 36,0%      | 936       | 68,9%      | 217       | 66,0%      |
| 2 personnes               | 2645                 | 34,1%      | 2202      | 36,3%      | 365       | 26,9%      | 78        | 23,7%      |
| 3 personnes               | 928                  | 12,0%      | 871       | 14,4%      | 33        | 2,4%       | 24        | 7,3%       |
| 4 personnes               | 566                  | 7,3%       | 539       | 8,9%       | 17        | 1,3%       | 10        | 3,0%       |
| + de 5 personnes          | 275                  | 3,5%       | 268       | 4,4%       | 7         | 0,5%       | 0         | 0,0%       |
| Total                     | 7747                 | 100%       | 6060      | 100%       | 1358      | 100%       | 329       | 100%       |

Du graphique n°3.1 et du tableau n°3.8, il ressort que les déplacements en voiture sont deux fois plus nombreux pendant les vacances d'été, tandis que les déplacements tous modes confondus sont plus importants sur la période allant de septembre 93 à janvier 94. Il y a donc une très forte saisonnalité des déplacements. De plus, l'effet des grandes vacances est particulièrement fort sur le mode routier. Cette saisonnalité doit aussi influencer les motifs de déplacement. En effet, les déplacements pour motifs privés doivent être proportionnellement plus importants pendant les grandes vacances. On devra alors isoler l'effet saisonnier pour étudier de manière précise l'effet du motif de déplacement sur le mode choisi et plus particulièrement pour le motif professionnel pur.

Tableau n° 3.8 : répartition modale selon la date du déplacement.

|         | Févr-93   | Mars-93    | avr-93     | mai-93     | juin-93    | juil-93    | août-93    | Sept-93    | oct-93     | nov-93     | déc-93     | janv-94    | févr-94    | Mars-94    | avr-94     | mai-94    | Total       |
|---------|-----------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|-----------|-------------|
| Voiture | 56<br>86% | 156<br>78% | 382<br>77% | 478<br>78% | 495<br>80% | 509<br>84% | 802<br>86% | 534<br>79% | 499<br>77% | 421<br>71% | 443<br>70% | 465<br>74% | 373<br>75% | 315<br>82% | 129<br>79% | 3<br>100% | 6060<br>78% |
| Train   | 8<br>12%  | 38<br>19%  | 91<br>18%  | 94<br>15%  | 87<br>14%  | 78<br>13%  | 100<br>11% | 115<br>17% | 119<br>18% | 152<br>26% | 150<br>24% | 140<br>22% | 105<br>21% | 54<br>14%  | 27<br>17%  | 0<br>0%   | 1358<br>18% |
| Avion   | 1<br>2%   | 7<br>3%    | 21<br>4%   | 37<br>6%   | 36<br>6%   | 18<br>3%   | 28<br>3%   | 31<br>5%   | 30<br>5%   | 21<br>4%   | 36<br>6%   | 24<br>4%   | 18<br>4%   | 14<br>4%   | 7<br>4%    | 0<br>0%   | 329<br>4%   |
| Total   | 65        | 201        | 494        | 609        | 618        | 605        | 930        | 680        | 648        | 594        | 629        | 629        | 496        | 383        | 163        | 3         | 7747        |

Graphique n° 3.1 : répartition modale selon la date

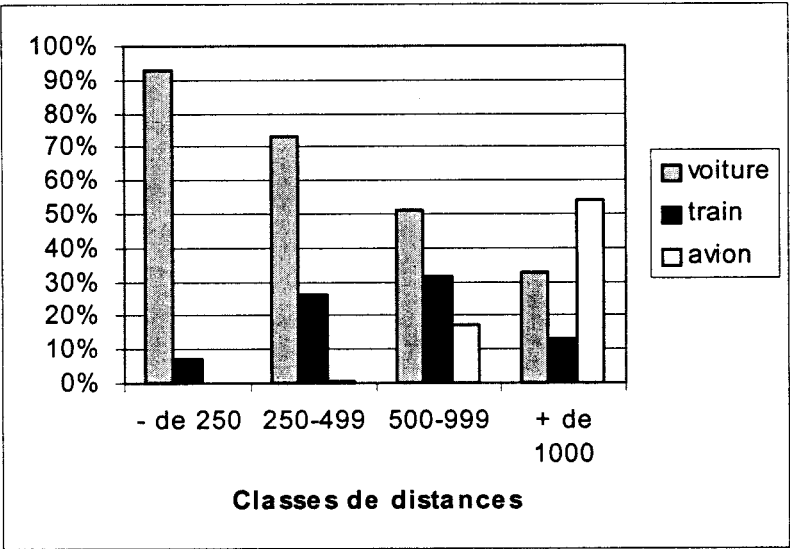


Le tableau n°3.9 et le graphique n°3.2 montrent qu'avec la distance, la part modale de la voiture diminue alors que celle de l'avion augmente fortement. Pour le train, elle augmente jusqu'à 1000 km pour se réduire ensuite. Il faut noter que, à des distances inférieures à 500 km, l'avion est rarement disponible : souvent les seuls modes existants sont la route et le fer. Il faudra en tenir compte en neutralisant l'alternative transport aérien quand aucune offre n'est disponible.

Tableau n° 3.9 : répartition modale selon la classe de distance.

|         | - de 250    | 250-499     | 500-999    | 1000-1499 | non déclaré | Total       |
|---------|-------------|-------------|------------|-----------|-------------|-------------|
| voiture | 3709<br>92% | 1510<br>73% | 785<br>51% | 28<br>33% | 28<br>53%   | 6060<br>78% |
| train   | 308<br>8%   | 535<br>26%  | 483<br>32% | 11<br>13% | 21<br>40%   | 1358<br>18% |
| avion   |             | 17<br>1%    | 262<br>17% | 46<br>54% | 4<br>8%     | 329<br>4%   |
| Total   | 4017        | 2062        | 1530       | 85        | 53          | 7747        |

Graphique n° 3.2 :répartition modale selon la classe de distance



Le tableau n°3.10 présente un certain nombre de statistiques descriptives par axe TGV. On observe une très faible représentation des femmes sur l'axe Ouest (39% de femmes) et sur l'axe Sud-Est (42% de femmes) par rapport à l'échantillon global. Les répartitions par âge font apparaître une part plus importante des 20-39 ans pour l'axe Nord ; ainsi qu'une part plus importante des plus de 60 ans pour les axes Sud-Est et Ouest. Les structures par âge et par sexe sont donc très différentes d'un axe à l'autre.

Concernant le mode de transport, le TGV est très fortement représenté sur l'axe Nord, l'avion sur l'axe Sud-Est. Pour les motifs de transport, les déplacements domicile-travail, pour études et professionnels sont prédominants sur l'axe Nord par rapport aux autres axes. L'axe Sud-Est est caractérisé par l'importance des vacances comme motif de déplacement. On observe que beaucoup de déplacements individuels s'effectuent plus fréquemment sur l'axe Nord que sur les autres axes.

**Tableau n° 3.10 : statistiques descriptives des déplacements et des caractéristiques des voyageurs les effectuant selon les axes TGV.**

|                            | NORD       |             | SUD-EST     |             | OUEST       |             | SUD-OUEST   |             | Total       |
|----------------------------|------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
|                            | effectif   | fréquence   | effectif    | fréquence   | effectif    | fréquence   | effectif    | fréquence   |             |
| <b>SEXE</b>                |            |             |             |             |             |             |             |             |             |
| Homme                      | 278        | 55%         | 1898        | 58%         | 1282        | 61%         | 1001        | 53%         | 4459        |
| Femme                      | 225        | 45%         | 1348        | 42%         | 829         | 39%         | 886         | 47%         | 3288        |
| <b>AGE</b>                 |            |             |             |             |             |             |             |             |             |
| - de 19 ans                | 25         | 5%          | 261         | 8%          | 193         | 9%          | 174         | 9%          | 653         |
| 20-39 ans                  | 278        | 55%         | 1275        | 39%         | 887         | 42%         | 769         | 41%         | 3209        |
| 40-59 ans                  | 157        | 31%         | 1200        | 37%         | 717         | 34%         | 713         | 38%         | 2787        |
| +60 ans                    | 39         | 8%          | 507         | 16%         | 314         | 15%         | 231         | 12%         | 1091        |
| données manquantes         | 4          | 1%          | 3           | 0%          |             | 0%          |             | 0%          | 7           |
| <b>MODE DE TRANSPORT</b>   |            |             |             |             |             |             |             |             |             |
| 3 et 4 roues               |            | 0%          | 3           | 0%          |             | 0%          | 8           | 0%          | 11          |
| Conducteur avec passager   | 135        | 27%         | 893         | 28%         | 629         | 30%         | 534         | 28%         | 2191        |
| Conducteur seul            | 87         | 17%         | 598         | 18%         | 388         | 18%         | 336         | 18%         | 1409        |
| Passager                   | 137        | 27%         | 864         | 27%         | 620         | 29%         | 550         | 29%         | 2171        |
| Tantôt pass, tantôt conduc | 12         | 2%          | 76          | 2%          | 118         | 6%          | 72          | 4%          | 278         |
| TGV 2cl                    | 51         | 10%         | 266         | 8%          | 237         | 11%         | 172         | 9%          | 726         |
| TGV 1cl                    | 18         | 4%          | 101         | 3%          | 28          | 1%          | 38          | 2%          | 185         |
| Autre train 2cl            | 47         | 9%          | 180         | 6%          | 46          | 2%          | 110         | 6%          | 383         |
| Autre train 1cl            | 12         | 2%          | 24          | 1%          | 10          | 0%          | 2           | 0%          | 48          |
| Train ss prec              | 4          | 1%          | 8           | 0%          |             | 0%          | 4           | 0%          | 16          |
| Avion                      |            | 0%          | 233         | 7%          | 35          | 2%          | 61          | 3%          | 329         |
| <b>MOTIF</b>               |            |             |             |             |             |             |             |             |             |
| Dom-trav, études, profess  | 159        | 32%         | 694         | 21%         | 402         | 19%         | 343         | 18%         | 1598        |
| Loisirs                    | 48         | 10%         | 351         | 11%         | 265         | 13%         | 192         | 10%         | 856         |
| Vacances                   | 14         | 3%          | 642         | 20%         | 281         | 13%         | 263         | 14%         | 1200        |
| Visite                     | 178        | 35%         | 1003        | 31%         | 826         | 39%         | 747         | 40%         | 2754        |
| Autres motifs              | 102        | 20%         | 537         | 17%         | 327         | 15%         | 340         | 18%         | 1306        |
| Données manquantes         | 2          | 0%          | 19          | 1%          | 10          | 0%          | 2           | 0%          | 33          |
| <b>TAILLE</b>              |            |             |             |             |             |             |             |             |             |
| Une personne               | 264        | 52%         | 1278        | 39%         | 1002        | 47%         | 789         | 42%         | 3333        |
| Deux personnes             | 143        | 28%         | 1155        | 36%         | 706         | 33%         | 641         | 34%         | 2645        |
| 3 personnes et plus        | 96         | 19%         | 813         | 25%         | 403         | 19%         | 457         | 24%         | 1769        |
| <b>Total</b>               | <b>503</b> | <b>100%</b> | <b>3246</b> | <b>100%</b> | <b>2111</b> | <b>100%</b> | <b>1887</b> | <b>100%</b> | <b>7747</b> |

On constate une disparité des modes de transport selon les axes géographiques. On retrouve ici un résultat que nous avons remarqué antérieurement : la présence de l'avion ne se manifeste que sur des déplacements longue distance.

### 3.1.2.3 L'exploitation de la variable revenu

Le revenu du ménage ou de l'individu qui effectue le déplacement constitue une variable clés dans l'analyse du choix modal. Nous allons plutôt considérer le revenu total du ménage. Dans l'enquête transport, cette variable est disponible sous deux formes : la première sous forme de tranches de revenu (en 9 classes), la seconde sous forme de montant total. Mais cette information n'est pas directement exploitable. Elle nécessite au préalable un traitement particulier.

#### 3.1.2.3.1 Le traitement de la variable sur les tranches de revenu.

L'utilisation d'une variable qualitative (qui contient plusieurs classes) peut se faire de deux manières différentes en économétrie. La première consiste tout simplement à l'introduire en tant que variable explicative dans la fonction. Il y aura alors autant de variables générées par la variable qualitative que celle-ci contiendra de classes. Une variable qualitative à  $n$  modalités générera  $n-1$  variables explicatives. Or, la variable sur les tranches de revenu de l'enquête transport contient beaucoup trop de classes<sup>13</sup> pour qu'on puisse l'utiliser directement. La seconde utilisation possible consiste à faire des estimations par tranche de revenu. On segmente ainsi la population selon leur revenu. On peut ainsi comparer le comportement de choix modal selon les tranches de revenu. Mais ceci n'est possible que s'il y a un nombre suffisant d'observations dans chaque tranche pour faire des estimations économétriques valides.

Pour ces deux raisons, nous regrouperons certaines tranches (cf. tableau n°3.11), d'où des classes moins nombreuses avec des effectifs plus importants.

---

<sup>13</sup> Elle en possède neuf classes

Tableau n° 3.11 : construction d'une nouvelle variables pour les tranches de revenu.

| Variable initiale |                            |           | Nouvelle variable |                            |           |
|-------------------|----------------------------|-----------|-------------------|----------------------------|-----------|
| Num               | Définition des tranches    | Effectifs | Num               | Définition des tranches    | Effectifs |
| 1                 | <30000Fr                   | 186       | 1                 | <75000Fr                   | 816       |
| 2                 | entre 30000Fr et 51000Fr   | 269       |                   |                            |           |
| 3                 | entre 51000Fr et 75000Fr   | 361       |                   |                            |           |
| 4                 | entre 75000Fr et 102000Fr  | 570       | 2                 | entre 75000Fr et 126000Fr  | 1282      |
| 5                 | entre 102000Fr et 126000Fr | 712       |                   |                            |           |
| 6                 | entre 126000Fr et 204000Fr | 2125      | 3                 | entre 126000Fr et 204000Fr | 2125      |
| 7                 | entre 204000Fr et 300000Fr | 1918      | 4                 | entre 204000Fr et 300000Fr | 1918      |
| 8                 | entre 300000Fr et 480000Fr | 990       | 5                 | >300000Fr                  | 1259      |
| 9                 | > 48000Fr                  | 269       |                   |                            |           |

3.1.2.3.2 Le traitement de la variable sur le montant du revenu

Pour plus de 25% des observations, l'information sur cette variable manque. On utilise alors la variable sur les tranches de revenu pour combler l'information manquante. En effet, cette variable étant parfaitement renseignée, nous pouvons l'utiliser comme proxy des valeurs manquantes. On utilisera pour cela le revenu moyen de chacune des classes pour remplacer les données manquantes<sup>14</sup>. Le tableau n°3.12 présente les valeurs moyennes observées et théoriques de chaque tranche de revenu. Les deux valeurs moyennes sont très proches l'une de l'autre.

Tableau n° 3.12°: approximation du revenu total

|   | Signification                  |      |            |            |
|---|--------------------------------|------|------------|------------|
| 1 | <30000Fr                       | 186  | 18 404 Fr  | 15 000 Fr  |
| 2 | entre 30 000 Fr et 51 000 Fr   | 269  | 406 31 Fr  | 40 500 Fr  |
| 3 | entre 51 000 Fr et 75 000 Fr   | 361  | 624 88 Fr  | 63 000 Fr  |
| 4 | entre 75 000 Fr et 102 000 Fr  | 570  | 888 56 Fr  | 88 500 Fr  |
| 5 | entre 102 000 Fr et 126 000 Fr | 712  | 114 109 Fr | 114 000 Fr |
| 6 | entre 126 000 Fr et 204 000 Fr | 2125 | 164 746 Fr | 165 000 Fr |
| 7 | entre 204 000 Fr et 300 000 Fr | 1918 | 243 688 Fr | 252 000 Fr |
| 8 | entre 300 000 Fr et 480 000 Fr | 990  | 359 474 Fr | 390 000 Fr |
| 9 | > 480 00 Fr                    | 269  | 671 927 Fr | .          |

<sup>14</sup> Nous allons prendre un exemple d'approximation du revenu total manquant : « un individu possédant un revenu se trouvant dans la tranche 4 aura pour approximation un revenu moyen de 88 500 Fr ».



## 3.2 Construction de la base d'offre

### 3.2.1 Caractéristiques générales de l'offre de transport interrégional de voyageurs

#### 3.2.1.1 Modes de transport utilisés

La voiture particulière constitue le mode de transport le plus utilisé. Le chemin de fer et l'avion constituent une offre de transport bien structurée et aisément accessible pour le voyageur. L'autocar se développe très rapidement, notamment pour les déplacements de loisirs, qu'il s'agisse de jeunes ou de personnes âgées ; cependant, l'offre en est très mal connue. En conséquence, compte tenu du fait que la quasi-totalité des déplacements à longue distance se font en voiture, train ou avion, nous nous intéresserons à la caractérisation de l'offre de ces trois modes.

On peut caractériser l'offre de transport par divers paramètres physiques et financiers que nous examinerons ci-dessous.

#### 3.2.1.2 Paramètres physiques de l'offre de transport

Les deux principaux paramètres sont le temps de déplacement et la couverture géographique du réseau. Mais bien d'autres paramètres peuvent être examinés, ils ont trait au confort et à la qualité de service du déplacement.

On peut citer :

***Le temps de transport***, comportant le temps de transport proprement dit, mais également,

- Le temps d'accès au système, c'est à dire le temps d'accès à la gare ou à l'aéroport, le temps de se garer,
- Le temps de précaution à prendre pour être certain de ne pas manquer le départ du train ou de l'avion.

Seul, le temps de transport stricto sensu est bien déterminé ; les autres temps varient suivant les voyageurs, les heures de la journée et les jours de la semaine, les lieux d'origine et de destination du voyage et le mode de transport utilisé.

Ces divers temps peuvent être globalisés dans la notion de temps généralisé qui constitue une sommation des divers temps partiels, éventuellement valorisés par des coefficients qui tiennent compte du caractère plus ou moins pénible de certains temps, par exemple le temps d'attente ou de précaution.

Temps généralisé =  $\sum$  temps partiels.

### ***La régularité du service offert***

Le temps de parcours peut varier en fonction de divers paramètres : par exemple, les conditions de circulation pour la voiture particulière, les conditions atmosphériques ou climatiques pour l'ensemble des modes de transport et les circonstances humaines ou matérielles.

La régularité du chemin de fer et celle, très proche, de l'avion constituent des atouts pour ces modes par rapport à la route, en dehors des périodes de perturbations dues à des incidents d'exploitation ou aux mouvements de grève.

### ***Les fréquences des services et la commodité des horaires***

Ces deux paramètres doivent permettre, en fonction de la distance de transport, d'effectuer des déplacements de journée ou de demi-journée et d'ajuster les horaires effectifs aux souhaits de la clientèle. Tous les modes de transport s'efforcent d'offrir des services importants matin et soir, quelquefois autour de midi. Quand la fréquence est élevée, l'offre est souvent cadencée toutes les heures, voire toutes les demi-heures.

### ***La couverture géographique***

Cette notion recouvre à la fois l'étendue géographique des services offerts et les possibilités de transfert d'un service à un autre par les correspondances. Le chemin de fer (cf.annexe n°4) et le transport aérien constituent des réseaux séparés, sans correspondances organisées de l'un à l'autre, sauf à Paris, avec l'implantation d'une gare TGV sur l'aéroport Charles de Gaulle.

La notion de réseau existe également, mais de façon différente pour la route. On peut distinguer, à l'intérieur d'un réseau routier général, divers réseaux caractérisés chacun par un

niveau de qualité de service différent, par exemple, le réseau des autoroutes à péage ou hors péage, le réseau local des voiries départementales.

D'autres paramètres physiques peuvent caractériser le service offert au voyageur.

***La sécurité*** du déplacement, avec des niveaux très différents dans le transport aérien ou ferroviaire et le transport routier. Ce paramètre est mal connu du grand public et sans doute mal valorisé par les entreprises de transport ; son impact sur le voyageur n'est pas évident. Il y a une très grande différence entre les transports collectifs assurés par des entreprises (avion, train) et le transport individuel. Le transport professionnel doit assurer dans tous les cas un transport sûr. La lecture des journaux montre à l'évidence cette différence d'approche.

***Le confort***, à la fois pendant le transport proprement dit et dans les conditions d'accueil. On peut citer, par exemple, l'organisation de l'espace de transport (compartiments, salons, coins pour les jeunes), l'ambiance générale (climatisation, insonorisation), la qualité des sièges, les possibilités de distraction (bar, cinéma, musique), la restauration et l'animation.

Pour les conditions d'accueil dans les gares ferroviaires, routières ou les aéroports, les éléments de confort tiennent au cheminement des passagers, au traitement des bagages, et à l'organisation des prestations principales (vente et contrôle des billets, contrôle de police et de douane) et des prestations annexes (salles d'attente, boutiques diverses).

De plus en plus, les transporteurs s'efforcent d'occuper le temps de transport ou d'attente afin que ce temps n'apparaisse plus seulement comme un temps perdu, mais un temps qui peut être valorisé par le voyageur pour son travail ou son loisir. Dans le premier cas, il s'agit de mettre à sa disposition des moyens de travail et de communication. Dans un second cas, il s'agit d'offrir aux voyageurs la possibilité d'occuper agréablement leur temps (lecture, boissons, déjeuner, achats divers).

### 3.2.1.3 Paramètres financiers de l'offre de transport

Il s'agit du coût du transport et des prestations diverses offertes aux voyageurs.

**Le transport individuel routier** est spécifique, car les seules dépenses directes sont constituées par les dépenses de carburants, de péages et de taxes de stationnement. Les dépenses indirectes sont décomptées sur des bases différentes, qu'il s'agisse de l'amortissement du véhicule, de son entretien, du garage, de l'assurance et des frais divers de réparation restant à la charge du propriétaire ou de l'utilisateur du véhicule.

**Pour les transports collectifs**, les prix payés par les voyageurs sont déterminés par les entreprises et homologués par les pouvoirs publics. On peut distinguer la structure tarifaire et le niveau tarifaire :

- *La structure tarifaire* comporte, le plus souvent, le tarif de base avec un certain nombre de modulations fonctions de la période de voyage, du nombre de voyages effectués pendant une période déterminée et de l'appartenance du voyageur à certains groupes socio-professionnels. Pour la SNCF et les transports routiers, le tarif de base est en général, une fonction affine de la distance de transport :  $T = a + b \times d$  ( $d$  = distance).

Il est variable suivant la classe de transport : à la SNCF, le tarif de 1<sup>ère</sup> classe est supérieur de 50% à celui de la 2<sup>ème</sup> classe.

Le tarif varie en fonction des périodes de voyage (jours de l'année, périodes horaires dans la journée). Chaque transporteur offre également des abonnements aux clients habituels, valables chacun sur une liaison déterminée, un ensemble de liaisons ou la totalité du réseau exploité par l'entreprise.

Enfin les transporteurs offrent des réductions spécifiques pour certains voyageurs : personnes âgées, couples, famille voyageant ensemble, jeunes, groupes. Il s'agit de réductions commerciales décidées par les entreprises. L'Etat, de son côté, a pris en charge des réductions intéressant les familles nombreuses et les déplacements de congés payés une fois par an. En contrepartie, l'Etat rembourse à la SNCF la différence entre le tarif plein et le tarif réduit, après un abattement tenant compte de l'élasticité du trafic au tarif réduit.

- *Le niveau tarifaire* correspond à la fixation des paramètres  $a$  et  $b$  de la formule ci-dessus. Ce niveau est, en général, homologué par les pouvoirs publics qui fixent aux entreprises des plafonds de hausse tenant compte de la politique de prix déterminée par le gouvernement.

La relative complexité des structures tarifaires rend difficiles les comparaisons de prix entre modes de transport. La comparaison des seuls tarifs de base est notoirement insuffisante pour expliquer le comportement des voyageurs. La concurrence entre modes de transport et à l'intérieur de chacun des modes complexifiés exige la prise en compte de la structure tarifaire, qui est fonction de très nombreux paramètres.

### **3.2.2 La base d'offre**

L'offre de transport se caractérise à la fois par l'infrastructure (réseaux routier et ferroviaire) - support physique des déplacements - et par les conditions dans lesquelles les déplacements s'effectuent, conditions liées à l'exploitation de l'offre.

Nous retiendrons parmi celles-ci :

- le temps de déplacement,
- le coût du déplacement,
- la fréquence des déplacements en transports collectifs.

Nous nous sommes inspirés de la démarche suivie par Schéou (1996) pour la construction de la base d'offre, et plus particulièrement dans le calcul des temps de transport.

#### **3.2.2.1 Les descripteurs de l'offre**

##### **3.2.2.1.1 Le temps de déplacement**

Le temps auquel nous faisons référence est le temps effectif par opposition au temps ressenti. En effet, une même durée n'est pas ressentie de la même façon par les usagers des transports en commun et ceux de la voiture particulière, de même qu'elle n'est pas ressentie de la même manière selon l'activité effectuée pendant le temps considéré.

.a La voiture particulière

Nous avons constitué une matrice O-D de l'ensemble des déplacements effectués sur notre zonage. Ensuite, nous avons utilisé le logiciel de recherche automatique d'itinéraires *Way*, qui à partir d'hypothèses sur les vitesses et les consommations de carburant détermine l'itinéraire le plus rapide et fournit une estimation du coût et du temps de déplacement sur le tronçon considéré.

- Le résultat du logiciel diffère de l'itinéraire que choisiraient les utilisateurs pour plusieurs raisons : les automobilistes ne minimisent pas nécessairement leur temps de déplacement. Ils ne le font pas quand la connaissance du réseau est incomplète ou quand un motif secondaire contraint leur itinéraire.
- Les automobilistes se répartissent sur différents itinéraires.

Malgré ces restrictions, on peut faire l'hypothèse qu'en moyenne, les distances, temps et coûts de consommation estimés sont des approximations correctes de la réalité.

Nous avons calculé à titre d'exemple le temps et le coût de déplacement sur le trajet Lille-Paris (cf. tableau n°3.13). La vitesse sur autoroute que nous avons retenue pour l'ensemble des déplacements suivant l'origine et la destination est de 115 km/h.

Tableau n° 3.13: Simulations sur l'axe Lille-Paris

| <i>Hypothèse retenue</i> | <i>Vitesse</i> | <i>type de voie</i>                                  | <i>Distance</i> | <i>Coût</i> | <i>temps</i> |
|--------------------------|----------------|------------------------------------------------------|-----------------|-------------|--------------|
| <i>le plus rapide</i>    | 115 km/h       | <i>Autoroute : 214 km<br/>route 4 voies : 8,5 km</i> | 223 km          | 100,66 F    | 2h10         |
| <i>le plus court</i>     | 115 km/h       | <i>Autoroute : 204 km<br/>route 4 voies : 17 km</i>  | 221 km          | 100,36 F    | 2h17         |
| <i>Nationale</i>         |                | <i>route 4 voies : 231 km</i>                        | 231 km          | 104,82      | 3h43         |

En plus du temps de déplacement en voiture, nous devons ajouter les temps de recherche d'une place de stationnement. Dans cette étude, nous n'en ferons pas usage car les informations nécessaires ne sont pas disponibles. De plus, l'impact de la recherche d'un stationnement est a priori relativement faible pour les déplacements longue distance.

*.b Le train*

Le temps de déplacement effectif (TDE) se compose de la somme du temps d'accès à la gare (TAG), du temps de précaution (TP), du temps de transport (TT) et du temps d'accès à la destination finale (TADF) :

$$TDE_{ij} = TAG_i + TP + TT_{ij} + TADF_j$$

$i$  étant l'indice repérant l'origine et  $j$  l'indice repérant la destination du déplacement considéré.

Nous supposons que le temps d'accès à la gare dans un sens de déplacement peut être considéré comme le temps d'accès à la destination finale dans le sens contraire.

$$TAG_i = TADF_i$$

Pour la modélisation du choix modal nous utiliserons plutôt un temps généralisé de transport.

**Le temps d'accès à la gare** (ou le temps d'accès à la destination finale) est le temps que peut mettre un individu pour se rendre à la gare (ou au domicile). Pour le déterminer, nous devons connaître son lieu de résidence et le moyen de transport qu'il utilise pour se rendre à la gare. Dans l'enquête transport nous connaissons le lieu de résidence, qui est généralement le lieu de départ du déplacement, et la distance de la gare la plus proche. Nous nous sommes servis de cet indicateur pour déterminer une approximation du temps d'accès à la gare. Le nombre de communes de résidence est trop élevé pour pouvoir définir un temps d'accès précis. Une approximation simple consiste en une estimation linéaire du temps d'accès en fonction de la distance du domicile à la gare (estimation par les MCO).

$$TAC_i = f(\text{distance du domicile à la gare})$$

En revanche, pour les déplacements qui ont pour origine ou destination la région de l'Ile de France, nous avons procédé à un traitement des temps d'accès spécifiques. Nous avons retenu uniquement les déplacements par RER pour aller du domicile à la gare. L'accessibilité à la gare n'étant pas la même d'un département à l'autre, l'idée est de faire une estimation pour chaque département d'Ile-de-France. Les résultats d'estimation sont présentés dans le tableau n°3.14.

**Tableau n° 3.14 : Résultats d'estimation du temps d'accès en fonction du département**

| <i>Département :</i> | <i>Constante</i> | <i>Distance</i> | <i>R<sup>2</sup></i> |
|----------------------|------------------|-----------------|----------------------|
| Seine-et-Marne       | 35,0<br>(4,8)    | 0,5<br>(3,6)    | 0,5599               |
| Yvelines             | 12,1<br>(2,7)    | 1,1<br>(10,7)   | 0,7921               |
| Essonne              | 11,8<br>(1,6)    | 1,1<br>(4,6)    | 0,5377               |
| Hauts-de-Seine       | 28,1<br>(3,3)    | 0,5<br>(0,8)    | 0,0208               |
| Seine-Saint-Denis    | 12,3<br>(1,3)    | 0,6<br>(1,2)    | 0,1048               |
| Val-de-Marne         | 10,3<br>(4,4)    | 1,1<br>(7,3)    | 0,8552               |
| Val-d'Oise           | 10,2<br>(0,7)    | 1,1<br>(1,9)    | 0,2246               |

*le nombre entre parenthèses est la statistique de Student*

**Le temps de transport :** L'offre ferroviaire est décrite à partir du fichier constitué par le CESA (Centre d'Etudes Supérieures en Aménagement - Université de Tours) à partir de la base horaire SNCF du service hiver 1993-94. Ce fichier correspond à une matrice gare à gare (440 gares, ferroviaires ou routières, référencées au total) des meilleurs temps de parcours et du nombre de relations journalières (tenant compte des possibilités de correspondances et des temps d'attente en résultant).

**Le temps de précaution :** S'agissant de déplacements à longue distance, les usagers connaissent parfaitement l'horaire de départ et nous fixerons le temps de précaution à 15 minutes.

Nous disposons à présent de l'ensemble des éléments pour évaluer le temps de transport généralisé sur l'aller et le retour.

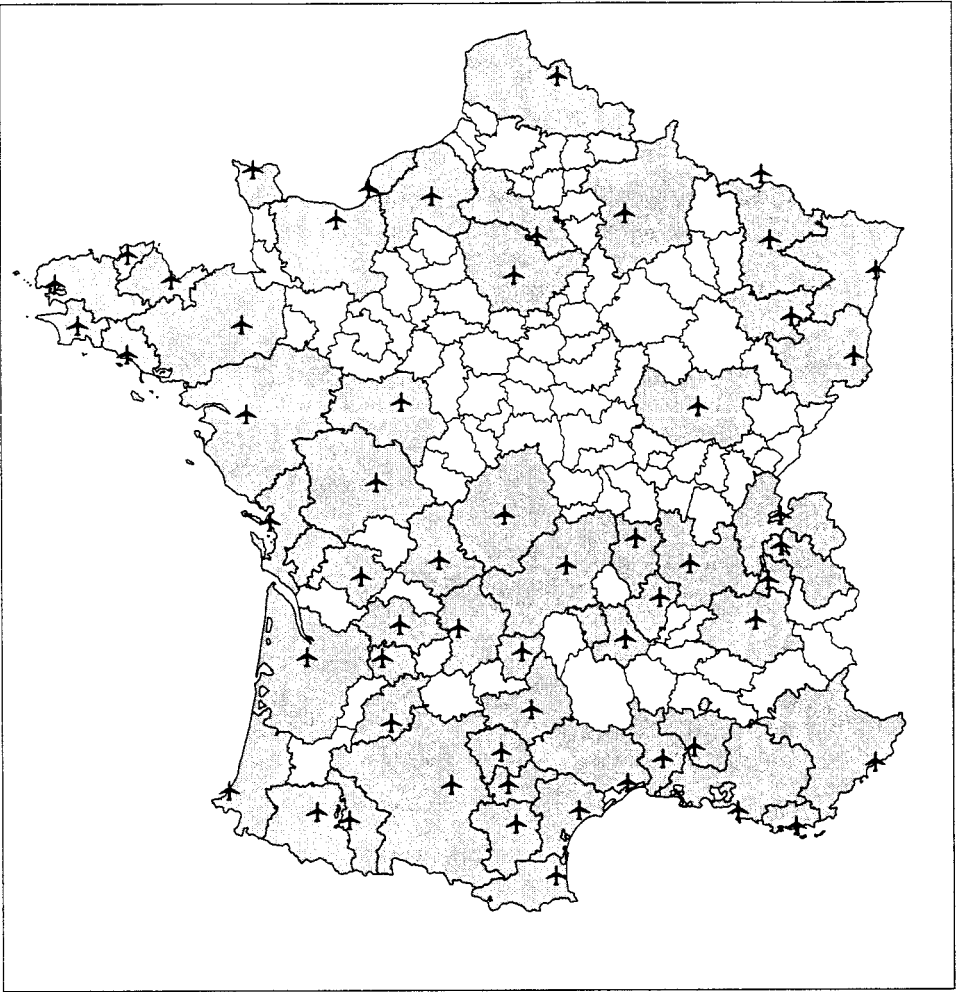
#### *.c L'avion*

Pour le transport aérien, on a constitué « à la main » une carte des zones d'attractivité des aéroports correspondant à un regroupement de zones d'emplois (cf. carte n°3.4). L'étendue d'une zone est



fonction de l'importance présumée de l'aéroport correspondant. Selon ce principe, à une zone d'emplois ne peut correspondre qu'un seul aéroport.

Carte n° 3.4 : Carte des aéroports et de leur zone d'attractivité (estimée)



Les déplacements de l'enquête sont considérés comme « réalisables » en avion si leur origine et leur destination sont à l'intérieur des zones d'influence respectives de deux aéroports reliés entre eux par un service aérien.

Comme pour le train, le temps de déplacement effectif (TDE) se compose de la somme du temps d'accès à l'aéroport (TAA), du temps d'attente (TA), du temps de transport (TT) et du temps d'accès à la destination finale (TADF) :

$$TDE_{ij} = TAA_i + TA + TT_{ij} + TADF_j$$

$i$  étant l'indice repérant l'origine et  $j$  l'indice repérant la destination du déplacement considéré.

Nous faisons la même hypothèse que pour le train :  $TAG_i = TADF_i$  c'est-à-dire le temps d'accès à l'aéroport dans un sens de déplacement peut être considéré comme le temps d'accès à la destination finale dans le sens contraire.

**Le temps d'accès à l'aéroport :** pour les déplacements qui ont pour origine ou destination une commune d'Ile-de-France, nous avons procédé de la même manière que pour le train. En revanche, pour les autres communes, nous avons retenu uniquement la voiture pour rejoindre l'aéroport. Le temps d'accès à l'aéroport est donc le temps de transport en voiture de la commune d'origine vers la commune de l'aéroport. Ce temps de transport a été obtenu à partir de la base d'offre routière du SETRA : elle fournit les temps de parcours minimaux entre zones d'emplois sur une base d'un réseau de 5 000 arcs.

**Le temps de transport :** la base d'offre aérienne a été fournie par la DGAC (Direction Générale de l'Aviation Civile) : elle référence l'ensemble des services aériens commerciaux réguliers du printemps 1995. Les données ont été synthétisées en termes de nombre de services quotidiens et de temps de vol pour chaque relation desservie.

**Le temps d'attente :** ce n'est pas vraiment un temps d'attente mais plutôt le temps nécessaire aux différentes tâches avant l'embarquement (temps d'enregistrement du passager et de ses bagages, temps passé dans la salle d'attente). Nous avons fixé le temps d'attente à 45 minutes.

#### 3.2.2.1.2 Les coûts de déplacement

##### *.a Le train*

Pour essayer de définir le prix du billet de train pour un individu mobile, il convient d'étudier avec minutie le système de tarification appliqué par la SNCF. Celui ci est fonction des horaires (niveau du train), des jours de la semaine du déplacement, de la période de l'année (été ou hiver), de l'âge, du nombre de personnes qui se déplacent ensemble et de la durée de réservation avant le départ (joker 8 et joker 30). La prise en compte de l'ensemble de ces éléments rend difficile la définition d'un prix conforme à la réalité. Nous allons tout d'abord

Nous faisons la même hypothèse que pour le train :  $TAG_i = TADF_i$  c'est-à-dire le temps d'accès à l'aéroport dans un sens de déplacement peut être considéré comme le temps d'accès à la destination finale dans le sens contraire.

**Le temps d'accès à l'aéroport :** pour les déplacements qui ont pour origine ou destination une commune d'Ile-de-France, nous avons procédé de la même manière que pour le train. En revanche, pour les autres communes, nous avons retenu uniquement la voiture pour rejoindre l'aéroport. Le temps d'accès à l'aéroport est donc le temps de transport en voiture de la commune d'origine vers la commune de l'aéroport. Ce temps de transport a été obtenu à partir de la base d'offre routière du SETRA : elle fournit les temps de parcours minimaux entre zones d'emplois sur une base d'un réseau de 5 000 arcs.

**Le temps de transport :** la base d'offre aérienne a été fournie par la DGAC (Direction Générale de l'Aviation Civile) : elle référence l'ensemble des services aériens commerciaux réguliers du printemps 1995. Les données ont été synthétisées en termes de nombre de services quotidiens et de temps de vol pour chaque relation desservie.

**Le temps d'attente :** ce n'est pas vraiment un temps d'attente mais plutôt le temps nécessaire aux différentes tâches avant l'embarquement (temps d'enregistrement du passager et de ses bagages, temps passé dans la salle d'attente). Nous avons fixé le temps d'attente à 45 minutes.

#### 3.2.2.1.2 Les coûts de déplacement

##### *a Le train*

Pour essayer de définir le prix du billet de train pour un individu mobile, il convient d'étudier avec minutie le système de tarification appliqué par la SNCF. Celui ci est fonction des horaires (niveau du train), des jours de la semaine du déplacement, de la période de l'année (été ou hiver), de l'âge, du nombre de personnes qui se déplacent ensemble et de la durée de réservation avant le départ (joker 8 et joker 30). La prise en compte de l'ensemble de ces éléments rend difficile la définition d'un prix conforme à la réalité. Nous allons tout d'abord

essayer de définir un prix de base du billet selon le trajet suivi et ensuite nous appliquerons les réductions possibles selon les caractéristiques de l'individu.

Le tarif de base se calcule en fonction de la distance en appliquant la relation suivante :  $T = a + b \times \text{distance}$ . Le tableau n°3.15 présente la valeur des paramètres a et b en vigueur pendant la période de l'enquête transport.

**Tableau n°3.15 : Les paramètres de calcul par plage de distance tarifaire sont les suivants**

| Distances tarifaires | Constante              |                       | Prix kilométrique      |                       |
|----------------------|------------------------|-----------------------|------------------------|-----------------------|
|                      | 1 <sup>re</sup> classe | 2 <sup>e</sup> classe | 1 <sup>re</sup> classe | 2 <sup>e</sup> classe |
| Jusqu'à 6 km         | 9,75 F                 | 6,50 F                | -                      | -                     |
| de 7 km à 34 km      | 0 F                    | 0 F                   | 1,3924 F               | 0,9283 F              |
| de 35 km à 249 km    | 18,30 F                | 12,00 F               | 0,8649 F               | 0,5766 F              |
| de 250 km à 449 km   | 89,34 F                | 59,56 F               | 0,5805 F               | 0,3870 F              |
| de 450 km à 9999 km  | 122,04 F               | 81,36 F               | 0,5079 F               | 0,3386 F              |

*Les réductions*

Pour connaître les réductions possibles, il suffit de confronter les informations concernant la personne enquêtée avec la grille de tarification en vigueur. Les caractéristiques utiles pour appliquer les réductions sont les suivantes : âge, taille du groupe qui se déplace, trimestre et année du déplacement.

*L'âge*

On peut aisément définir un prix selon l'âge. Si l'individu à moins de 25 ans, il pourra bénéficier du carrissimo, qui lui procurera des réductions allant de 20 à 50 % selon le niveau du train (les trains de niveaux 1, 2 et 3 bénéficient de 50 % de réduction et de 20 % pour les trains de niveau 4). Si l'individu a plus de 60 ans, il pourra aussi bénéficier d'une réduction allant de 20 à 50%. Il faut dans ce cas déterminer le taux à appliquer.

Plus de 22 % des déplacements sont effectués par des individus jeunes ou âgés (cf. tableau n°3.6). Pour lever ce problème, on fera l'hypothèse que les gens choisissent leurs horaires de départ en fonction des réductions, donc le taux retenu sera celui de 50%.

#### *La taille du groupe*

Un groupe bénéficie d'une réduction de 30 % s'il est composé de plus de 6 personnes. Or dans l'enquête transport, les déplacements en groupe de cette taille ne représentent qu'une très faible part des déplacements (cf. tableau n°3.7). Ce sont plutôt des couples ou des groupes de 3 à 4 personnes. Une famille bénéficie d'une réduction en fonction du nombre d'enfants d'âge inférieur à 18 ans.

#### *La date du déplacement :*

La SNCF utilise deux tarifications différentes : une pour la période d'hiver (du 29 septembre au 1<sup>er</sup> juin de l'année suivante) et une autre pour la période estivale (du 2 juin au 28 septembre). On a appliqué à chaque déplacement le tarif spécifique à la période à laquelle il appartient.

#### *.b La voiture particulière*

L'utilisation d'une voiture particulière entraîne ou peut entraîner les coûts suivants pour l'utilisateur :

- la consommation en essence,
- le péage autoroutier,
- les frais de stationnement,
- l'amortissement du véhicule,
- les dépenses d'entretien et de réparation,
- les frais d'assurance.

Le compte rendu d'une étude menée en 1981 par le « *Transport Studies Unit* » de l'Université d'Oxford sur la perception des coûts d'une voiture indique que les automobilistes distinguent parfaitement les coûts de possession, à savoir les coûts afférents au maintien d'une voiture en état de marche, des coûts d'utilisation. Mais la précision de la perception de ces deux catégories distinctes de coûts est très variable en fonction de la personne qui règle les factures mais aussi en fonction de la fréquence des coûts. A la suite de leur étude, les auteurs émettent les hypothèses suivantes :

⇒ dans la mesure où les conducteurs calculent les coûts de fonctionnement, leurs estimations se fondent sur le seul coût de l'essence, de sorte que le « coût perçu d'utilisation de la voiture pour le travail » ne comprend généralement pas le coût de l'usure, de l'entretien ou de l'amortissement.

⇒ seuls les déplacements les plus réguliers et les plus fréquents, en particulier les déplacements domicile-travail sont perçus comme ayant un coût monétaire théorique.

⇒ il est exceptionnel que les automobilistes calculent les coûts d'un déplacement occasionnel (c'est à dire marginal), la plupart d'entre eux n'en ont une idée que pour des voyages lointains, habituellement pour le motif loisirs.

Bien que l'étude date d'une vingtaine d'années, ces hypothèses nous semblent toujours actuelles et nous ne tiendrons compte dans les calculs que des coûts de consommation en essence et des coûts de péage. Ces coûts sont évalués à l'aide du logiciel *Way*, en lui indiquant l'année du déplacement car il tient compte du prix du péage existant à cette période. Quant aux coûts de stationnement, il ne nous était pas possible de les prendre en compte car nous n'avons pas une connaissance exacte du lieu de destination.

#### .c L'avion

Nous avons utilisé les informations de la DGAC, qui référence l'ensemble des services aériens commerciaux réguliers du printemps 1995. Elle a pu recueillir les tarifs en classe économique en février 93 et avril 94 pour les relations desservies par Air Inter/Air France, en février 93 pour celles desservies par TAT et en février 94 pour celles desservies par Air Littoral. Les tarifs pour les relations desservies par d'autres compagnies (qui ne devraient concerner qu'une petite minorité de relations) n'ont pas été sauvegardés sur la période 1993/1996.

### 3.3 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons pu construire un zonage qui garantit un effectif de déplacement suffisant pour l'estimation de modèle économétrique. De plus, ce zonage nous offre une bonne concurrence entre les modes de transport.

A partir de celui-ci, nous avons pu construire l'ensemble des variables d'offre de transport (temps et coût de déplacement pour chaque mode). Cette construction et les hypothèses qui en découlent vont conditionner les estimations du modèle de choix modal longue distance. Nous verrons ainsi dans le chapitre suivant la pertinence de ces hypothèses.

# **CHAPITRE 4**

## **RESULTATS D'ESTIMATION DU CHOIX MODAL**

### **VOYAGEUR**

Dans le chapitre précédent, nous avons construit le zonage ainsi que les variables nécessaires à la modélisation du choix modal longue distance. Notre objectif consiste désormais à rechercher la modélisation qui permet de retranscrire au mieux le choix modal des voyageurs. Nous allons donc confronter les différents modèles entre eux, et tester plusieurs spécifications afin de ne conserver que celles ayant un sens d'un point de vue économique<sup>15</sup> et statistique<sup>16</sup>. Notre étude portera sur la concurrence entre la route, le fer et l'avion.

Ce chapitre s'articule en trois parties.

Dans un premier temps, nous nous intéresserons à la représentation de la fonction d'utilité. Plus spécifiquement, nous testerons la pertinence d'un point de vue statistique d'une non-linéarité de la fonction d'utilité en appliquant la transformation de Box-Cox ou, plus simplement, en introduisant des termes quadratiques. Nous testerons également le modèle à coefficients aléatoires, qui permet de prendre en compte l'existence de préférences hétérogènes.

---

<sup>15</sup> c'est-à-dire le respect de la cohérence des signes

<sup>16</sup> c'est-à-dire la qualité de l'ajustement et de la prédiction du modèle

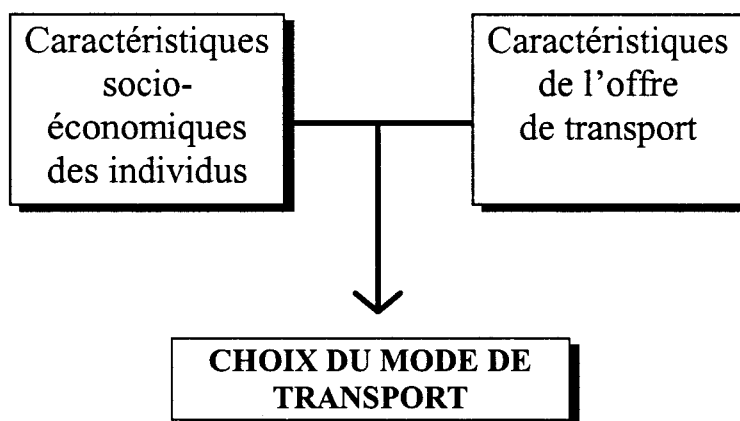


Ensuite, nous testerons les différents modèles économétriques traitant des choix discrets. Les modèles retenus pour ces analyses sont au nombre de quatre : le modèle Logit de base, le modèle Logit conditionnel (McFadden), le modèle Logit emboîté et enfin le modèle Probit.

Enfin, nous nous attarderons sur les différentes techniques d'agrégation, afin de procéder à des simulations du choix modal en fonction de variables socio-économiques.

Au préalable, nous commencerons par un bref rappel théorique.

Nous supposons que la combinaison des caractéristiques socio-économiques des individus et du niveau d'offre disponible suffisent à expliquer le comportement de la demande. Ainsi, le cadre théorique de la modélisation de la demande peut être schématisé (INRETS, 1988) de la façon suivante :



Les variables retenues pour définir les **caractéristiques socio-économiques** sont les suivantes :

- le sexe ;
- l'âge de la personne B (celle qui se déplace) et non celui du chef de famille ;
- la catégorie socioprofessionnelle. Nous distinguons huit catégories : cadre supérieur, profession intermédiaire, artisan, ouvrier, employé, agriculteur, retraité et inactif ;
- le revenu annuel.

Pour caractériser complètement la demande de transport, on introduit des variables décrivant la nature du voyage réalisé. Il s'agit :

- des motifs de déplacement. Ceux que nous retenons dans notre étude sont au nombre de cinq : professionnels, visites, vacances, loisirs, autres motifs ;
- de la taille du groupe qui se déplace. Nous distinguons trois catégories de taille : une personne, deux personnes et plus de deux personnes ;
- de la durée du séjour. Cette variable a été divisée en quatre catégories : une journée, deux jours, entre trois et sept jours, plus d'une semaine.

Les variables retenues pour **caractériser l'offre de transport** sont pour chaque mode :

- le temps de transport généralisé,
- le coût de déplacement.

Il s'agit de variables classiques généralement utilisées dans la modélisation du choix modal. Notre démarche consistera d'abord à introduire ces variables de base dans nos modèles. Il sera ensuite plus aisé d'enrichir ces derniers en introduisant des variables génériques ou tout simplement en utilisant d'autres variables existant dans l'enquête.

## 4.1 La représentation de la fonction d'utilité.

La recherche d'une représentation adaptée de la fonction d'utilité portera uniquement sur les variables d'offre (i.e. le temps et le coût de transport).

### 4.1.1 Transformation de Box et Cox

Rappelons que la transformation de Box et Cox d'une variable  $x$  se présente sous la forme suivante :

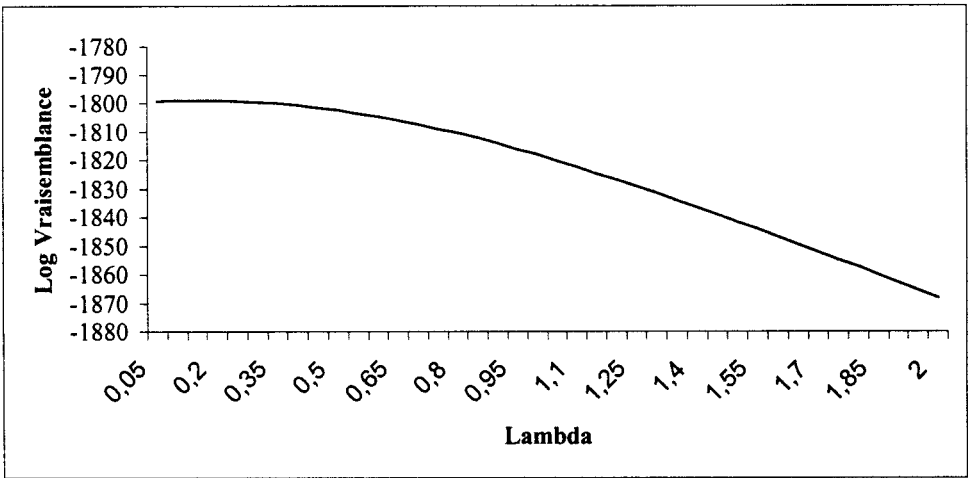
$$BC_{\lambda}(x) = \frac{x^{\lambda} - 1}{\lambda} \text{ et } \lambda \neq 0, x > 0$$
$$BC_{\lambda}(x) = \ln(x) \text{ et } \lambda = 0, x > 0$$

L'usage de cette transformation permet de sortir du strict cadre des formes linéaires pour les fonctions d'utilité (Gaudry et alii (1987), Tiem et alii (1993)). Son intérêt tient au fait que, en l'absence de guide fourni par la théorie sur la forme fonctionnelle de l'utilité, il n'y a aucune raison que les restrictions inhérentes à une forme linéaire soient valides. Dans ce contexte, il est intéressant de tester d'éventuelles non linéarités sur les variables quantitatives de la spécification, notamment les variables d'offre<sup>17</sup>. La transformation de Box-Cox permet ceci.

Nous opérons une transformation de Box et Cox sur les variables d'offre (coût et temps de transport). Le calibrage a lieu en deux étapes. Dans un premier temps, nous recherchons les valeurs de  $\lambda$  qui maximisent la vraisemblance du modèle, puis nous introduisons la transformation de Box-Cox avec la valeur de  $\lambda$  ainsi obtenue. En procédant de cette manière, on ne peut tester la significativité du paramètre  $\lambda$ .

Le graphique 4.1 illustre l'évolution du log de la vraisemblance du modèle transformé en fonction de  $\lambda$ . On constate que celle-ci est maximale pour une valeur nulle du paramètre  $\lambda$ , ce qui correspond à une transformation logarithmique. Nous appliquerons donc cette transformation.

Graphique n° 4.1 : Log vraisemblance en fonction de Lambda



<sup>17</sup> l'introduction de transformations sur les variables socio-économiques binaires est impossible.

On trouvera au tableau 4.1 ci-dessous les résultats d'estimation du modèle linéaire et du modèle avec les variables transformées en utilisant la transformation logarithmique (correspondant à une Box-Cox de paramètre 0). L'usage de cette transformation se traduit par une augmentation sensible de la vraisemblance, qui passe de - 4611 à - 4588, soit une différence de 23. La statistique de log-vraisemblance correspondante est donc de 46, ceci nous conduit au rejet de la spécification linéaire à tous les niveaux de risque usuel.

Tableau n° 4.1 : Résultats d'estimation du modèle Logit.

|                                              | Spécification logarithmique |                     |                     | Spécification linéaire     |                     |                     |
|----------------------------------------------|-----------------------------|---------------------|---------------------|----------------------------|---------------------|---------------------|
|                                              | Voiture                     | Train               | Avion               | Voiture                    | Train               | Avion               |
| Transformation logarithmique ( $\lambda=0$ ) |                             |                     |                     | Variables non transformées |                     |                     |
| Coût de transport                            | -2,3033<br>(-19,88)         | -0,3542<br>(-9,86)  | -1,1788<br>(-6,68)  | -0,0061<br>(-13,98)        | -0,0020<br>(-4,40)  | -0,0016<br>(-12,04) |
| Temps de transport                           | -1,2047<br>(-8,85)          | -2,1921<br>(-31,96) | -1,2273<br>(-10,16) | -0,0060<br>(-8,04)         | -0,0087<br>(-22,83) | -0,0101<br>(-11,90) |
| Constante                                    | 6,6178<br>(5,60)            | -0,2401<br>(-0,20)  |                     | 1,3458<br>(6,19)           | -0,4823<br>(-2,22)  |                     |
| Nombre d'observations                        | 7607                        |                     |                     | 7607                       |                     |                     |
| Log Vraisemblance à zéro                     | -8357                       |                     |                     | -8357                      |                     |                     |
| Log Vraisemblance de $\beta$                 | -4588                       |                     |                     | -4611                      |                     |                     |

le nombre entre parenthèses représente le t de student

Pour juger de la qualité statistique des résultats et pour comparer avec les autres modèles, on trouvera dans le tableau n°4.2 les tables de succès.

Tableau n° 4.2 : Tables de succès des modèles logit

Spécification logarithmique

|                                      | Voiture | Train | Avion | Total observé |
|--------------------------------------|---------|-------|-------|---------------|
| Voiture                              | 4592    | 1082  | 261   | 5935          |
| Train                                | 660     | 527   | 159   | 1346          |
| Avion                                | 80      | 110   | 137   | 326           |
| Total prévu                          | 5332    | 1718  | 557   | 7607          |
| Pourcentage de<br>prévision correcte | 77%     | 39%   | 42%   | 69%           |

*Spécification linéaire*

|                                      | Voiture | Train | Avion | Total observé |
|--------------------------------------|---------|-------|-------|---------------|
| Voiture                              | 4518    | 1187  | 230   | 5935          |
| Train                                | 723     | 473   | 150   | 1346          |
| Avion                                | 68      | 105   | 153   | 326           |
| Total prévu                          | 5309    | 1765  | 533   | 7607          |
| Pourcentage de<br>prévision correcte | 76%     | 35%   | 47%   | 68%           |

Le taux global de prévision correcte diffère peu d'une spécification à l'autre : 69% contre 68%. On notera, dans les deux cas, la difficulté à prévoir le trafic ferroviaire (soit 1346 déplacements), les deux modèles estimant plus fréquemment le choix de la voiture pour les passagers du train (soit 723 déplacements) que le choix du train (soit 473 déplacements). On constatera par la suite qu'il s'agit d'un problème récurrent. Bien que demeurant élevée, l'erreur est cependant plus faible dans la spécification logarithmique que dans la spécification linéaire. Par contre, la prévision de l'avion se dégrade : on passe de 47% de prévisions correctes sur le modèle linéaire à 42% avec la spécification logarithmique.

On aura donc une appréciation ambivalente de l'effet de transformations non-linéaires de type Box-Cox. Sur un plan économique, elles ne semblent pas améliorer notablement la spécification du modèle. En revanche, sur un plan purement statistique, on obtient des prévisions de meilleure qualité.

**4.1.2 Modèle à coefficients aléatoires**

Il est naturel de supposer que la perception du temps par un individu peut être sujette à un aléa et que, même si elle reste constante pour un même individu, elle varie d'une personne à l'autre. Il en résulte des valeurs du temps réparties aléatoirement dans l'ensemble de la population (Ben-Akiva et alii (1993), Train (1998) et Leurent (1998)). Ce qui, nous l'avons vu au chapitre 2, conduit naturellement à une spécification où le paramètre associé à la variable « temps de transport » est aléatoire. Afin de vérifier cette hypothèse, nous allons donc estimer un modèle à coefficients aléatoires.

En raison d'un défaut de convergence de l'algorithme, nous n'avons pas pu estimer de modèle utilisant une distribution log-normale. Seule la distribution normale a pu être testée. Les résultats obtenus sont présentés dans le tableau n°4.3.

**Tableau n° 4.3 : Résultats d'estimation du modèle à coefficients aléatoires.**

|                       | Auto     | Train    | Avion    |
|-----------------------|----------|----------|----------|
| Temps de transport    |          |          |          |
| Moyenne               | -0,0099  | -0,0099  | -0,0099  |
|                       | (-24,79) | (-24,79) | (-24,79) |
| Ecart-type            | 0,0001   | 0,0001   | 0,0001   |
|                       | (0,31)   | (0,31)   | (0,31)   |
| Coût de transport     | -0,0048  | -0,0048  | -0,0048  |
|                       | (-23,10) | (-23,10) | (-23,10) |
| Age                   | 0,0154   | 0,0166   |          |
|                       | (3,64)   | (3,91)   |          |
| Une personne          | -1,9268  |          |          |
|                       | (-16,98) |          |          |
| Deux personnes        |          | 0,9615   |          |
|                       |          | (8,24)   |          |
| Professionnel         | -1,4439  | -1,2600  |          |
|                       | (-9,11)  | (-8,24)  |          |
| Constante             | -2,1003  | -5,4183  |          |
|                       | (-5,96)  | (-13,95) |          |
| Nombre d'observations | 7700     |          |          |
| Log vraisemblance (0) | -8459    |          |          |
| Log vraisemblance (B) | -3433    |          |          |

*le nombre entre parenthèses représente le t de student*

Un premier constat s'impose : la variance estimée de la distribution des coefficients du temps est très faible et n'est pas significativement différente de zéro. En conséquence, on peut accepter l'hypothèse d'un coefficient non aléatoire du temps de transport et donc d'une valeur du temps uniforme pour l'ensemble de la population. On nuancera cependant cette conclusion en rappelant que le test a été réalisé avec une distribution normale. Une distribution log-normale aurait été préférable. Cependant, compte tenu de l'acceptation de l'hypothèse d'une valeur nulle avec la distribution normale, il est peu probable que les résultats du test avec une loi log-normale conduisent à une conclusion opposée.

Pour juger de la qualité statistique des résultats et pour permettre la comparaison avec les autres modèles, on trouvera au tableau n° 4.4 la table de succès du modèle.

**Tableau n°4.4 : Table de succès du modèle à coefficients aléatoires**

|                      |         | Part modale prévue |            |            |             |
|----------------------|---------|--------------------|------------|------------|-------------|
|                      |         | voiture            | Train      | Avion      | Total       |
| Part modale observée | Voiture | 5749               | 143        | 122        | <b>6014</b> |
|                      | Train   | 911                | 336        | 111        | <b>1358</b> |
|                      | Avion   | 113                | 84         | 131        | <b>328</b>  |
|                      | Total   | <b>6773</b>        | <b>563</b> | <b>364</b> | <b>7700</b> |

Le choix d'un modèle à coefficients aléatoires se traduit par une nette dégradation de la qualité de la prévision par rapport aux modèles antérieurs. Plus encore que ses prédécesseurs, ce modèle sous-estime fortement les choix du train. Les erreurs sur la voiture demeurent également importantes.

Le modèle à coefficients aléatoires n'apparaît donc pas satisfaisant, ni sur le plan économique, ni sur le plan statistique.

### 4.1.3 Linéarité du temps

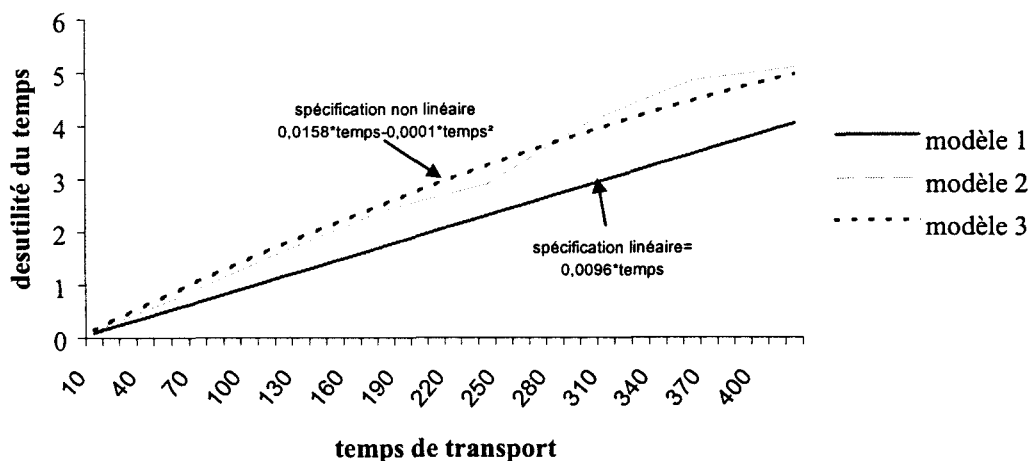
Nous avons montré que la transformation de Box-Cox optimale était une transformation logarithmique des variables coûts et temps, et nous avons rejeté le modèle à coefficients aléatoires. On peut supposer cependant que d'autres formes possibles de non-linéarité de la fonction d'utilité conviennent.

Pour ce faire, nous allons nous inspirer de la démarche de Ben-Akiva et Lerman (1985). Celle-ci consiste à remplacer la variable temps de transport par des tranches de temps, et nous testerons l'hypothèse selon laquelle ces coefficients peuvent varier d'une tranche à l'autre. Nous avons construit les variables représentant ces tranches de temps de la manière suivante :

$$\begin{aligned} \text{Temps de transport (moins de 1 heure)} &= \begin{cases} t & \text{si } t < 60 \\ 60 & \text{sinon} \end{cases} \\ \text{Temps de transport (de 1 à 2 heures)} &= \begin{cases} 0 & \text{si } t < 60 \\ t-60 & \text{si } 60 < t < 120 \\ 60 & \text{sinon} \end{cases} \\ \text{Temps de transport (de 2 à 3 heures)} &= \begin{cases} 0 & \text{si } t < 120 \\ t-120 & \text{si } 120 < t < 180 \\ 60 & \text{sinon} \end{cases} \\ \text{Temps de transport (de 3 à 4 heures)} &= \begin{cases} 0 & \text{si } t < 180 \\ t-180 & \text{si } 180 < t < 240 \\ 60 & \text{sinon} \end{cases} \\ \text{Temps de transport (de 4 à 5 heures)} &= \begin{cases} 0 & \text{si } t < 240 \\ t-240 & \text{si } 240 < t < 300 \\ 60 & \text{sinon} \end{cases} \\ \text{Temps de transport (de 5 à 6 heures)} &= \begin{cases} 0 & \text{si } t < 300 \\ t-300 & \text{si } 300 < t < 360 \\ 60 & \text{sinon} \end{cases} \\ \text{Temps de transport (Plus de 6 heures)} &= \begin{cases} 0 & \text{si } t < 360 \\ t-360 & \text{sinon} \end{cases} \end{aligned}$$

Les désutilités du temps évaluées à partir des six paramètres estimés pour chacune des tranches horaires sont représentées sur le graphique n°4.2. Elles correspondent à la courbe intitulée « modèle 2 ».

**Graphique n° 4.2 : désutilité du temps de transport**



Nous avons également fait figurer sur ce graphique les désutilités évaluées sur la base de l'estimation du modèle linéaire (modèle 1). On obtient dans ce cas une demi-droite. On constate que les valeurs pour les différentes tranches horaires ne sont pas alignées. Elles



forment une courbe concave qui se situe au dessus de la droite du modèle 1. On retrouve de ce fait un résultat classique : la sensibilité au temps diminue avec la durée du déplacement. On supporte plus facilement la perte d'une demi-heure sur un très long trajet que sur un court trajet.

Le choix d'un modèle linéaire semble donc introduire un biais sur l'évaluation des effets du temps de transport. Il est facile de confirmer cette observation en testant la linéarité de la spécification avec un test du  $\chi^2$  de l'hypothèse nulle d'égalité de l'ensemble des coefficients du temps dans le modèle 2. Il suffit pour cela de calculer la statistique du rapport de vraisemblance entre le modèle 2 et le modèle 1, soit :  $-2(-3779+3748) = 62$ . Puisque  $\chi^2_{0.95,6} = 12,6$ , nous rejetons la spécification linéaire de la fonction d'utilité.

L'inconvénient majeur de l'usage de coefficients spécifiques à des tranches tient dans une perte importante de degrés de liberté. Un nombre élevé de tranches conduit à estimer un nombre élevé de coefficients avec, de plus, un faible nombre d'observations dans certaines tranches. Un autre problème lié à cette méthode se situe au niveau du choix des bornes des intervalles des différentes tranches. Elles sont généralement définies de manière arbitraire. Pour ces deux raisons, nous cherchons d'autres spécifications dont les résultats s'approchent le plus possible, de ceux que nous avons obtenus en utilisant des tranches. Or, nous constatons que la courbe du modèle 2 présente une forme quadratique. Nous estimons donc un troisième modèle (modèle 3) avec une forme quadratique pour la variable du temps de transport. On ajoute la variable temps de transport au carré dans le modèle 1 pour obtenir le modèle 3 (cf. tableau n°4.5).

Tableau n°4.5 : résultats d'estimations des spécifications non-linéaires.

|                                          | Modèle 1            | Modèle 2            | Modèle 3            |
|------------------------------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| Coût de transport                        | -0,0044<br>(-22,24) | -0,0040<br>(-20,61) | -0,0042<br>(-21,52) |
| Temps de transport                       | -0,0096<br>(-22,84) |                     | -0,0159<br>(-13,30) |
| Temps de transport au carré              |                     |                     | 0,000010<br>(5,72)  |
| Temps de transport (de 1 heure)          |                     | -0,0126<br>(-4,51)  |                     |
| Temps de transport (de 1 à 2 heures)     |                     | -0,0133<br>(-5,42)  |                     |
| Temps de transport (de 2 à 3 heures)     |                     | -0,0167<br>(-7,94)  |                     |
| Temps de transport (de 3 à 4 heures)     |                     | -0,0096<br>(-4,32)  |                     |
| Temps de transport (de 4 à 5 heures)     |                     | -0,0224<br>(-8,26)  |                     |
| Temps de transport (de 5 à 6 heures)     |                     | -0,0163<br>(-6,26)  |                     |
| Temps de transport (de plus de 6 heures) |                     | -0,0046<br>(-5,47)  |                     |
| Constante pour la voiture                | -2,5340<br>(-8,99)  | -1,7778<br>(-6,04)  | -2,1857<br>(-7,71)  |
| Constante pour le train                  | -4,3938<br>(-14,57) | -3,6148<br>(-11,56) | -4,0622<br>(-13,47) |
| Nombre d'observation                     | 7700                | 7700                | 7700                |
| ln Vraisemblance de Béta                 | -3779               | -3748               | -3763               |
| ln Vraisemblance à zéro                  | -8459               | -8459               | -8459               |

*le nombre entre parenthèses représente le t de student*

La courbe du modèle 3 (cf. graphique 4.2) s'ajuste parfaitement à la courbe du modèle 2. Par conséquent, nous choisissons le modèle quadratique, qui présente un avantage en termes de gains de degré de liberté.

***Transformation de Box-Cox ou forme quadratique ?***

Nous avons montré que la forme linéaire n'était pas adaptée à la modélisation du choix modal. Nous avons le choix entre la transformation logarithmique (il s'agit de la meilleure forme dans la famille des transformations de Box et Cox) et la forme quadratique. Pour départager ces deux modèles, nous allons comparer leurs qualités prédictives et explicatives respectives. Le tableau 4.6 présente les résultats d'estimation du modèle Logit conditionnel avec une spécification quadratique.

On constate que la vraisemblance du modèle quadratique est un peu plus élevée que celle du modèle Box-Cox (-4535 contre -4588). On ne peut pas cependant exploiter ce résultat pour tester un modèle contre l'autre, les deux spécifications n'étant pas emboîtées.

Tableau n°4.6 : résultats d'estimations du modèle avec temps au carré.

|                             | Voiture      |              | Train        |              | Avion        |              |
|-----------------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
|                             | Coefficients | t de Student | Coefficients | t de Student | Coefficients | t de Student |
| Coût de transport           | -0,0059      | -14,33       | -0,0026      | -5,70        | -0,0014      | -12,41       |
| Temps de transport          | -0,0239      | -15,23       | -0,0159      | -15,85       | -0,0220      | -4,62        |
| Temps de transport au carré | 0,000030     | 12,27        | 0,000009     | 6,50         | 0,000032     | 2,48         |
| Constante                   | 2,7933       | 6,23         | 0,0535       | 0,12         |              |              |
| Nombre d'observations       | 7607         |              |              |              |              |              |
| Log Vraisemblance à zéro    | -8357        |              |              |              |              |              |
| Log Vraisemblance de Béta   | -4535        |              |              |              |              |              |

En ce qui concerne la qualité prédictive des deux modèles, on trouvera dans le tableau 4.7 la table de succès du modèle quadratique. On peut la comparer avec celle du modèle logarithmique (tableau 4.2). On constate que les résultats prédictifs des deux modèles sont très proches.

Tableau n° 4.7 : Table de succès du modèle avec temps au carré

|                                   | Voiture | Train | Avion | Total observé |
|-----------------------------------|---------|-------|-------|---------------|
| Voiture                           | 4547    | 1151  | 237   | 5935          |
| Train                             | 688     | 504   | 154   | 1346          |
| Avion                             | 79      | 99    | 148   | 326           |
| Total prévu                       | 5314    | 1754  | 540   | 7607          |
| Pourcentage de prévision correcte | 77%     | 37%   | 45%   | 68%           |

Bien qu'il soit difficile de départager statistiquement les deux modèles, sur le plan économique, on préférera le modèle quadratique. Nous verrons plus tard, qu'il vérifie les hypothèses posées sur la valeur du temps.

## 4.2 Choix du modèle économétrique

Nous allons maintenant nous intéresser aux choix des différents modèles économétriques. Cette étape est essentielle dans la mesure où, d'une part, elle déterminera le modèle de référence ; et d'autre part elle nous permettra de tester l'ensemble des variables disponibles.

### 4.2.1 Logit simple ou logit conditionnel ?

A titre de référence, nous allons commencer par estimer le modèle logit multinomial simple. Ce dernier repose certes sur des hypothèses restrictives peu susceptibles d'être vérifiées dans le contexte du choix modal. Cependant, comme les autres modèles de la famille à valeurs extrême généralisées apparaissent comme des extensions du logit simple, il fournit un point de départ utile.

En particulier, une des caractéristiques de base du modèle tient dans la prise en compte des spécificités de chaque mode de transport. On a le choix ici entre le modèle logit simple et le modèle logit conditionnel. Avec le premier, les effets des variables explicatives sont les mêmes quel que soit le mode de transport choisi. Avec le second, ces effets varient d'un mode de transport à l'autre (Bouyaux (1988)). Si le modèle logit simple est préféré, on ne peut pas calculer la valeur du temps. En effet, les paramètres estimés du coût et du temps ne sont pas spécifiques à l'alternative choisie. Dans le cas où l'utilisation du logit conditionnel est nécessaire, on aura une seule valeur du temps par mode. On s'intéressera donc tout d'abord au choix entre ces deux modèles.

#### 4.2.1.1 Modèle logit multinomial simple

Pour l'estimation du logit multinomial simple, la modalité de référence choisie est la voiture. Les résultats d'estimation figurent dans le tableau 4.8. Le modèle estimé est globalement significatif, bien que beaucoup de variables ne le soient pas individuellement.

Les coefficients du premier groupe de variables portant sur les caractéristiques de l'offre ne présentent pas les signes attendus. En effet, le temps de transport en avion a un effet positif sur la probabilité de choisir ce dernier. Une augmentation unilatérale du temps de transport en avion entraînerait donc une augmentation de sa part modale ! Nous ne développerons pas l'analyse des résultats de ce modèle, car avec des signes erronés, il ne parvient pas à retranscrire convenablement le phénomène étudié.

**Tableau n° 4.8 : Résultats d'estimation du modèle multinomial logit simple (/voiture)**

| Variables explicatives                                 | Train        |              | Avion        |              |
|--------------------------------------------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
|                                                        | Coefficients | t de Student | Coefficients | t de Student |
| <b><i>Caractéristiques de l'offre de transport</i></b> |              |              |              |              |
| Coût voiture                                           | 0,0067       | 9,47         | 0,0050       | 4,75         |
| Temps voiture                                          | 0,0208       | 9,05         | 0,0295       | 4,03         |
| Temps voiture au carré                                 | -0,00003     | -9,74        | -0,00002     | -2,18        |
| Coût train                                             | -0,0048      | -6,52        | -0,0053      | -5,36        |
| Temps train                                            | -0,0107      | -7,67        | 0,0056       | 1,63         |
| Temps train au carré                                   | 0,00001      | 4,32         | -0,00001     | -1,58        |
| Coût avion                                             | -0,0001      | -0,42        | -0,0012      | -2,81        |
| Temps avion                                            | 0,0048       | 1,28         | 0,0488       | 5,28         |
| Temps avion au carré                                   | -0,00001     | -1,30        | -0,00014     | -5,63        |
| <b><i>Caractéristiques de l'individu</i></b>           |              |              |              |              |
| Age                                                    | 0,0004       | 0,39         | -0,0239      | -4,28        |
| Homme                                                  | 0,0591       | 0,72         | -0,1611      | -0,90        |
| PCS (réf. Employé, agriculteur)                        |              |              |              |              |
| Cadre supérieur                                        | -0,3563      | -3,37        | 0,4355       | 1,90         |
| Profession intermédiaire                               | -0,1441      | -1,45        | -0,1771      | -0,77        |
| Ouvrier                                                | -0,8161      | -5,22        | -1,3830      | -2,70        |
| Nombre de voitures                                     | -0,4898      | -8,21        | 0,0755       | 0,56         |
| Revenu (réf. Revenu de + de 300 000 fr)                |              |              |              |              |
| Revenu <70 000                                         | -0,3029      | -2,03        | 0,3362       | 0,95         |
| Revenu entre 70 000 et 130 000                         | -0,3652      | -2,75        | -0,9110      | -2,65        |
| Revenu entre 130 000 et 200 000                        | -0,6144      | -5,18        | -0,6667      | -2,65        |
| Revenu entre 200 000 et 300 000                        | -0,0717      | -0,64        | -0,4210      | -1,94        |
| Distance parcourue en voiture                          | 0,0000       | -11,67       | 0,0000       | -0,86        |
| <b><i>Caractéristiques du déplacement</i></b>          |              |              |              |              |
| Taille du groupe (réf. +plus de deux pers)             |              |              |              |              |
| Une personne                                           | 2,3136       | 14,38        | 1,5829       | 5,95         |
| Deux personnes                                         | 1,4410       | 8,89         | 0,9404       | 3,39         |
| Motif du déplacement (réf. Visite)                     |              |              |              |              |
| Professionnel                                          | 0,5201       | 4,97         | 1,2139       | 5,00         |
| Vacances                                               | -0,9727      | -7,71        | -0,9696      | -4,19        |
| Loisirs                                                | -0,7191      | -4,98        | -0,3598      | -1,10        |
| Durée du séjour (réf. + de trois jours)                |              |              |              |              |
| Une journée                                            | -0,3707      | -3,27        | 1,6075       | 5,18         |
| Deux jours                                             | -0,2961      | -2,30        | 0,9177       | 3,00         |
| Trois jours                                            | -0,0281      | -0,24        | 0,9785       | 3,99         |
| Constante                                              | -2,9818      | -11,06       | -13,4568     | -10,69       |
| Nombre d'observations                                  | 7607         |              |              |              |
| Log Vraisemblance à zéro                               | -4831        |              |              |              |
| Log Vraisemblance de Béta                              | -2886        |              |              |              |

Pourtant, sur un plan purement statistique, le modèle est satisfaisant. Selon le tableau n° 4.9 ci-dessous, la prévision globale des parts modales observées est correcte : elle est prévu dans 84% des cas. On notera cependant que cette qualité globale de prévision est essentiellement

le fait du mode dominant, la voiture, pour laquelle 95% des déplacements observés sont prévus correctement. La situation est nettement moins satisfaisante du côté des modes minoritaires, en particulier le train, un problème que nous avons déjà signalé plus haut. En effet, sur les 1346 déplacements en train, le modèle ne prévoit correctement que 576 déplacements ; il en attribue 729 à la voiture (soit 153 déplacements de plus que le train !) et 41 à l'avion.

**Tableau n°4.9 : Tables de succès du modèle logit simple**

|                                      | Voiture     | Train      | Avion      | Total observé |
|--------------------------------------|-------------|------------|------------|---------------|
| Voiture                              | 5630        | 272        | 33         | 5935          |
| Train                                | 729         | 576        | 41         | 1346          |
| Avion                                | 86          | 47         | 193        | 326           |
| <b>Total prévu</b>                   | <b>6445</b> | <b>895</b> | <b>267</b> | <b>7607</b>   |
| Pourcentage de<br>prévision correcte | 95%         | 43%        | 59%        | 84%           |

La difficulté d'utilisation de ce type de modèle vient essentiellement du fait que nous combinons des variables qui sont spécifiques au mode et des variables spécifiques à l'individu. L'utilisation simultanée de ces deux types de variables est à l'origine de mauvais résultats. La solution envisagée consiste à utiliser un modèle logit conditionnel.

**4.2.1.2 Logit Conditionnel**

Les apports du modèle logit conditionnel sont de trois types :

1. Il nous est possible de construire une fonction d'utilité pour chaque mode de transport. Le coût et le temps de transport sont cette fois-ci introduits spécifiquement dans chacune des fonctions d'utilité, ce qui permet de capter l'effet propre à ces variables. Les autres ne sont prises en compte que dans la fonction d'utilité de la voiture et du train.
2. Nous obtenons un meilleur traitement de la concurrence multimodale. L'avion n'est en concurrence avec les autres modes que sur de distances supérieures à 500 km. Pour les distances inférieures à 500 km, deux modes seulement restent en concurrence. Nous pouvons estimer le choix modal en tenant compte de ce biais de modélisation.
3. Nous pouvons pondérer le partage modal. En effet, ce dernier est très déséquilibré en faveur de la voiture (qui représente généralement 80 % des modes utilisés). Le mode

prédominant est alors surestimé lors de la modélisation. L'introduction d'une pondération sur les parts modales permet de corriger ce déséquilibre.

Le premier apport conduit à modifier la spécification du modèle en démultipliant certains paramètres : on remplace un paramètre générique à tous les modes par plusieurs paramètres spécifiques à chaque mode. On suppose, par exemple, que le poids du coût du trajet peut être différent selon le mode ; en relâchant la contrainte de généralité de ce coût, et en substituant à son poids deux paramètres génériques des modes, la voiture et le train, on aboutit à la spécification suivante :

$$V_{in} = \alpha + \beta \text{Coût}_{in} \begin{cases} V_{in} = \alpha + \beta_{voiture} \text{Coût}_{in} & \text{si } i \text{ est le mode voiture} \\ V_{in} = \alpha + \beta_{train} \text{Coût}_{in} & \text{si } i \text{ est le mode train} \end{cases}$$

Nous avons ainsi réalisé une décomposition sur les trois variables génériques aux trois modes : le coût, le temps de transport et le temps au carré. Ce faisant, on aboutit aux résultats suivants, repris dans le tableau n° 4.10.

Nous observons que les paramètres estimés ont les signes attendus. Les estimations du coût et du temps de transport ont toutes un signe négatif et sont très significativement différentes de zéro. Sur ce point au moins, l'utilisation d'un modèle logit conditionnel améliore de manière significative la qualité du modèle.

Pour ce qui est des autres variables, on s'intéressera d'abord aux caractéristiques de l'individu qui se déplace. On constate que l'âge agit positivement sur la probabilité de choisir la voiture et/ou le train. Par contre, les paramètres estimés pour le sexe ne sont pas significatifs. Il n'y aurait donc pas, dans ce domaine, de différences importantes de comportement entre hommes et femmes. En ce qui concerne les catégories socioprofessionnelles, les résultats font apparaître une nette tendance des cadres supérieurs à choisir l'avion, toutes choses égales par ailleurs (il faut rappeler ici que les effets de revenu sont pris en compte par une autre variable). A l'opposé, les ouvriers sous-utilisent l'avion,



surtout au profit de la voiture, à un moindre degré, le train. On retrouve cette même tendance, mais moins marquée, pour les professions intermédiaires. Enfin, l'effet du revenu est mal estimé pour les plus pauvres (moins de 70 000 francs par an). Pour les autres, on constate de manière prévisible une croissance de la part modale de l'avion avec le niveau de revenu, principalement au détriment de la voiture, à un plus faible degré au détriment du train. Enfin, le nombre de véhicules dans le ménage, ainsi que la distance annuelle parcourue en voiture influencent positivement et de manière significative la probabilité de choisir la voiture. Par contre, ils agissent négativement sur la probabilité de choisir le train.

Tableau n°4.10 : résultats d'estimation d'un modèle logit conditionnel

|                                            | Voiture      |              | Train        |              | Avion        |              |
|--------------------------------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
|                                            | Coefficients | t de Student | Coefficients | t de Student | Coefficients | t de Student |
| Caractéristiques de l'offre de transport   |              |              |              |              |              |              |
| Coût de transport                          | -0,0061      | -12,00       | -0,0038      | -7,41        | -0,0010      | -7,71        |
| Temps de transport                         | -0,0229      | -12,81       | -0,0133      | -11,18       | -0,0311      | -4,65        |
| Temps de transport au carré                | 0,000027     | 9,72         | 0,000006     | 3,28         | 0,000069     | 3,88         |
| <i>Caractéristiques de l'individu</i>      |              |              |              |              |              |              |
| Age                                        | 0,0176       | 6,80         | 0,0182       | 7,16         |              |              |
| Homme                                      | 0,0598       | 0,73         | 0,1881       | 2,32         |              |              |
| PCS (réf. Employé, agriculteur)            |              |              |              |              |              |              |
| Cadre supérieur                            | 0,0114       | 0,11         | -0,4304      | -4,28        |              |              |
| Profession intermédiaire                   | 0,3186       | 3,03         | 0,1643       | 1,59         |              |              |
| Ouvrier                                    | 1,2741       | 6,01         | 0,4932       | 2,31         |              |              |
| Nombre de voitures                         | 0,1403       | 2,39         | -0,3252      | -5,85        |              |              |
| Revenu (réf. Revenu de + de 300000 fr)     |              |              |              |              |              |              |
| Revenu <70 000                             | -0,2712      | -1,55        | -0,5886      | -3,69        |              |              |
| Revenu entre 70 000 et 130 000             | 1,0413       | 6,96         | 0,7025       | 4,87         |              |              |
| Revenu entre 130 000 et 200 000            | 0,6951       | 5,53         | 0,1079       | 0,90         |              |              |
| Revenu entre 200 000 et 300 000            | 0,3393       | 3,22         | 0,2284       | 2,24         |              |              |
| Distance parcourue en voiture              | 0,0000       | 2,86         | 0,0000       | -11,35       |              |              |
| <i>Caractéristiques du déplacement</i>     |              |              |              |              |              |              |
| Taille du groupe (réf. +plus de deux pers) |              |              |              |              |              |              |
| Une personne                               | -1,4912      | -12,55       | 0,9228       | 7,01         |              |              |
| Deux personnes                             | -0,8266      | -7,16        | 0,7064       | 5,37         |              |              |
| Motif du déplacement (réf. Visite)         |              |              |              |              |              |              |
| Professionnel                              | -1,3582      | -10,87       | -0,8785      | -7,55        |              |              |
| Vacances                                   | 0,9296       | 8,12         | -0,0792      | -0,73        |              |              |
| Loisirs                                    | 0,5287       | 3,79         | -0,2243      | -1,63        |              |              |
| Durée du séjour (réf. + de trois jours)    |              |              |              |              |              |              |
| Une journée                                | -0,5306      | -3,41        | -0,9998      | -6,36        |              |              |
| Deux jours                                 | -0,3677      | -2,81        | -0,7238      | -5,62        |              |              |
| Trois jours                                | -0,6469      | -5,45        | -0,7066      | -6,34        |              |              |
| Constante                                  | 2,9519       | 4,39         | 0,1689       | 0,25         |              |              |
| Nombre d'observations                      | 7607         |              |              |              |              |              |
| Log Vraisemblance à zéro                   | -8357        |              |              |              |              |              |
| Log Vraisemblance de Béta                  | -3668        |              |              |              |              |              |

En ce qui concerne les caractéristiques du déplacement, on observe tout d'abord des valeurs très significatives des paramètres sur la taille du groupe. On peut en conclure que les voyages à une ou deux personnes se font moins fréquemment en voiture mais plus souvent en train. On constate le résultat inverse pour les déplacements en groupes. Le motif professionnel exerce un très fort effet négatif sur la probabilité de choisir le train ou la voiture. Il a donc un net effet positif sur la probabilité de choisir l'avion. En ce qui concerne les autres motifs, les vacances et les loisirs, les déplacements s'effectuent plutôt en voiture.

La part modale du train est cependant peu affectée. Les variables de durée de séjour ont également un effet très significatif. On fait plus souvent appel au train ou à la voiture pour des séjours de longue durée (plus de trois jours). A l'inverse pour des durées courtes, on privilégiera plutôt l'avion.

On trouvera dans la tableau 4.11 ci-dessous la table de succès.

**Tableau n°4.11 : Tables de succès du modèle logit conditionnel**

|                                   | Voiture | Train | Avion | Total observé |
|-----------------------------------|---------|-------|-------|---------------|
| Voiture                           | 4844    | 911   | 180   | 5935          |
| Train                             | 544     | 666   | 136   | 1346          |
| Avion                             | 60      | 87    | 179   | 326           |
| Total prévu                       | 5448    | 1663  | 495   | 7607          |
| Pourcentage de prévision correcte | 82%     | 49%   | 55%   | 75%           |

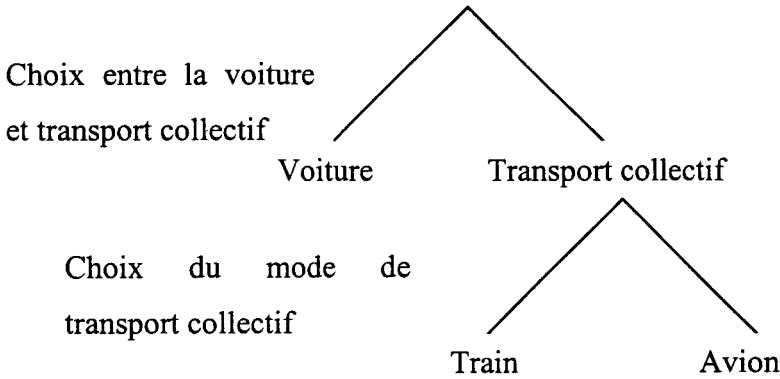
On améliore considérablement la prévision des modes minoritaires, i.e. le train et l'avion. Pour la voiture, la prédiction reste de bonne qualité. En revanche, comme nous l'avions observé plus haut pour le modèle logit standard, la difficulté majeure réside dans la capacité à réaliser une bonne prédiction du choix du mode ferroviaire. Sur ce point, l'utilisation du modèle logit conditionnel améliore nettement les résultats. Les erreurs de prévision concernant l'avion augmentent légèrement mais, sur ce mode très minoritaire, restent correctes.

Nous obtenons un modèle satisfaisant, avec des effets des variables explicatives aisément interprétables sur le plan économique et une nette amélioration de la représentation de la part modale du train. Il s'agissait en effet du principal point faible du modèle antérieur.

### 4.2.2 Le modèle logit emboîté.

L'utilisation du modèle logit simple ou conditionnel ne nous permet pas de tenir compte des interdépendances possibles entre les modalités, conduisant au problème d'indépendance des alternatives non pertinentes. Celui-ci se pose bien avec notre échantillon, comme nous avons pu le vérifier en faisant le test d'Hausman et McFadden (1984) pour rechercher l'existence ou l'absence d'une indépendance entre les alternatives. La statistique de test, qui suit une loi du chi-deux à six degrés de liberté, est égale à 137. Sachant que  $\chi^2_{0,95,6} = 12,6$ , nous sommes donc conduit à rejeter l'hypothèse d'indépendance des termes d'erreur.

La solution la plus fréquente consiste à utiliser un modèle logit emboîté. Dans cette optique, les corrélations les plus vraisemblables sont celles qui existent entre le transport collectif et le transport individuel. Le modèle logit emboîté va donc reproduire le choix entre un mode de transport individuel (voiture) et un mode transport collectif (train ou avion). Le processus de choix va être le suivant :



Globalement, les résultats d'estimation ne sont que peu modifiés (tableau n°4.12). On notera cependant que l'estimateur de valeur inclusive est significativement différent de zéro, conformément à la conclusion à laquelle le test de Hausman et McFadden (1984) nous avait conduit. Il y a donc bien interaction entre les deux modes de transport collectif. De ce fait, on préférera l'utilisation d'un logit emboîté à celle d'un modèle logit conditionnel.

Tableau n°4.12 : résultats d'estimation du modèle logit emboîté

|                                            | Voiture      |              | Train        |              | Avion        |              |
|--------------------------------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
|                                            | Coefficients | t de Student | Coefficients | t de Student | Coefficients | T de Student |
| Caractéristiques de l'offre de transport   |              |              |              |              |              |              |
| Coût de transport                          | -0,0061      | -11,23       | -0,0038      | -6,96        | -0,0011      | -4,45        |
| Temps de transport                         | -0,0227      | -11,23       | -0,0161      | -4,04        | -0,0329      | -4,03        |
| Temps de transport au carré                | 0,0000       | 9,26         | 0,0000       | 1,94         | 0,0001       | 3,33         |
| <b>Caractéristiques de l'individu</b>      |              |              |              |              |              |              |
| Age                                        | 0,0146       | 2,87         | 0,0177       | 4,49         |              |              |
| Homme                                      | 0,0504       | 0,45         | 0,2087       | 1,65         |              |              |
| PCS (réf. Employé, agriculteur)            |              |              |              |              |              |              |
| Cadre supérieur                            | 0,0407       | 0,28         | -0,4550      | -2,91        |              |              |
| Profession intermédiaire                   | 0,2972       | 2,08         | 0,1616       | 1,01         |              |              |
| Ouvrier                                    | 1,2502       | 3,95         | 0,5555       | 1,43         |              |              |
| Nombre de voitures                         | 0,1829       | 2,01         | -0,3207      | -3,81        |              |              |
| Revenu (réf. Revenu de + de 300000 fr)     |              |              |              |              |              |              |
| Revenu <70 000                             | -0,2250      | -0,97        | -0,6222      | -2,57        |              |              |
| Revenu entre 70 000 et 130 000             | 1,0182       | 5,09         | 0,7889       | 3,08         |              |              |
| Revenu entre 130 000 et 200 000            | 0,6921       | 4,13         | 0,1267       | 0,68         |              |              |
| Revenu entre 200 000 et 30 0000            | 0,3309       | 2,47         | 0,2489       | 1,71         |              |              |
| Distance parcourue en voiture              | 0,0000       | 2,08         | 0,0000       | -7,66        |              |              |
| <b>Caractéristiques du déplacement</b>     |              |              |              |              |              |              |
| Taille du groupe (réf. +plus de deux pers) |              |              |              |              |              |              |
| Une personne                               | -1,5444      | -8,32        | 0,9664       | 4,37         |              |              |
| Deux personnes                             | -0,8544      | -4,87        | 0,7599       | 3,29         |              |              |
| Motif du déplacement (réf. Visite)         |              |              |              |              |              |              |
| Professionnel                              | -1,2997      | -8,21        | -0,9410      | -5,20        |              |              |
| Vacances                                   | 0,9293       | 5,88         | -0,0947      | -0,55        |              |              |
| Loisirs                                    | 0,5433       | 2,62         | -0,2456      | -1,07        |              |              |
| Durée du séjour (réf. + de trois jours)    |              |              |              |              |              |              |
| Une journée                                | -0,4092      | -1,71        | -0,9984      | -4,83        |              |              |
| Deux jours                                 | -0,3068      | -1,64        | -0,7502      | -4,04        |              |              |
| Trois jours                                | -0,6020      | -3,83        | -0,7479      | -4,59        |              |              |
| Constante                                  | 3,1401       | 4,14         | 0,3923       | 0,44         |              |              |
| Valeur inclusive                           | 0,8552       | 5,46         |              |              |              |              |
| Nombre d'observations                      |              | 7607         |              |              |              |              |
| Log Vraisemblance à zéro                   |              | -6432        |              |              |              |              |
| Log Vraisemblance de Béta                  |              | -3667        |              |              |              |              |

Pour un jugement de la qualité statistique des résultats et pour une comparaison avec le modèle conditionnel, on trouvera ci-dessous le tableau n°4.13 qui donne la table de succès du modèle.

Tableau n°4.13 : Table de succès du modèle logit emboîté

|                                   | Voiture | Train | Avion | Total observé |
|-----------------------------------|---------|-------|-------|---------------|
| Voiture                           | 4838    | 919   | 178   | 5935          |
| Train                             | 546     | 668   | 132   | 1346          |
| Avion                             | 61      | 84    | 180   | 326           |
| Total prévu                       | 5445    | 1671  | 491   | 7607          |
| Pourcentage de prévision correcte | 82%     | 50%   | 55%   | 79%           |

Par rapport au modèle logit conditionnel, nous n’observons qu’une amélioration marginale de la qualité de la prévision.

Finalement, on retiendra que les différentes techniques d'estimation ont permis, à partir du modèle Logit de base, d'obtenir des résultats cohérents avec le comportement de choix modal et des gains de vraisemblance. Mais ces gains restent limités et apparaissent principalement dans le passage du modèle logit simple au modèle logit conditionnel.

4.2.3 Choix de segmentation des déplacements

Le dernier « point sensible » des modèles réside dans l'hétérogénéité des populations et des types de déplacements sur lesquels ils sont calibrés : des estimateurs globaux, issus d'un vaste échantillon représentatif, peuvent masquer des différences importantes. Il ne s'agit pas d'une variabilité purement individuelle, mais au contraire de différences typiques divisant l'échantillon en sous-groupes dont les comportements de choix sont homogènes.

Les segmentations envisageables sont les suivantes :

- par axe, en exploitant la segmentation que nous avons utilisée pour construire notre échantillon,
- par motif, en considérant ici deux motifs de déplacement : le motif privé et le motif professionnel.

#### 4.2.3.1 Segmentation par axe

Rappelons que les déplacements extraits de l'enquête correspondent à quatre grands axes de déplacement desservis par des lignes de TGV : les axes Sud-Ouest, Sud-Est, Ouest et Nord. Pour les trois premiers, nous avons estimé un modèle logit conditionnel sur les trois alternatives habituelles, la voiture, le train et l'avion. Pour l'axe Nord, l'avion est inexistant. Compte tenu des distances à couvrir et des temps de parcours usuels sur cet axe, l'avion, dans les rares cas où il est disponible, n'est donc pas une alternative valable. En conséquence, nous nous sommes contentés d'un logit conditionnel binaire sur la voiture et le train.

Le choix du logit conditionnel préféré ici au logit emboîté s'explique à la fois par la nécessité de comparer les quatre axes (un logit emboîté est exclu pour l'axe Nord) et par le fait que le logit emboîté modifie peu les estimations et n'ajoute guère à la qualité de prévision. Il n'était donc pas nécessaire de rechercher une procédure d'estimation plus lourde que le logit conditionnel.

Pour chaque axe, nous avons utilisé, comme pour le modèle global, une spécification quadratique de la fonction d'utilité, dont on peut trouver les résultats dans le tableau n°4.14. On notera que le coefficient du terme quadratique n'est pas significativement différent de zéro pour les axes Sud-Est et Ouest. Pour ces deux axes, une spécification linéaire suffirait. Enfin, le signe de certains paramètres d'offre est contraire aux prévisions : il s'agit du temps de transport en avion sur l'axe Sud-Est et du coût de transport par avion sur l'axe Ouest.

**Tableau n° 4.14 : résultats d'estimation du modèle logit conditionnel pour chaque axe**

|                             | Sud Ouest (1875 obs.) |                    |                    | Sud Est (3222 obs.) |                     |                       | Ouest (2103 obs.)    |                      |                    | Nord (500 obs.)   |                   |
|-----------------------------|-----------------------|--------------------|--------------------|---------------------|---------------------|-----------------------|----------------------|----------------------|--------------------|-------------------|-------------------|
|                             | Auto                  | Train              | Avion              | Auto                | Train               | Avion                 | Auto                 | Train                | Avion              | Auto              | Train             |
| Constante                   | 1.5230<br>(1,19)      | -3.5125<br>(-2,86) |                    | 5.4635<br>(2,30)    | -1.2977<br>(-2,055) |                       | 0.7644<br>(0,45)     | -4.2148<br>(-2,59)   |                    | 7.280<br>(4,85)   |                   |
| Coût de transport           | -0,0031<br>(-2,85)    | -0,0070<br>(-4,58) | -0,0012<br>(-2,45) | -0,0053<br>(-3,98)  | -0,0030<br>(-3,52)  | -0,0019<br>(-3,50)    | -0,0157<br>(-8,75)   | -0,0012<br>(-0,45)   | 0,0020<br>(5,02)   | -0,008<br>(-1,24) | -0,010<br>(-4,32) |
| Temps de transport          | -0,0330<br>(-6,27)    | -0,0144<br>(-4,55) | -0,0721<br>(-3,75) | -0,0229<br>(-5,98)  | -0,0125<br>(-4,86)  | 0,0010<br>(0,04)      | -0,0013<br>(-0,16)   | -0,0107<br>(-2,22)   | -0,1316<br>(-7,08) | -0,110<br>(-3,46) | -0,026<br>(-3,51) |
| Temps de transport au carré | 0,00003<br>(3,59)     | 0,00001<br>(2,30)  | 0,00017<br>(2,90)  | 0,000026<br>(5,67)  | 0,000006<br>(1,79)  | -0,0000031<br>(-0,05) | -0,000002<br>(-0,14) | -0,000003<br>(-0,31) | 0,00029<br>(5,75)  | 0,00038<br>(3,31) | 0,00004<br>(2,21) |
| Age                         | 0,0272<br>(4,62)      |                    |                    | 0,0351<br>(3,926)   | 0,0343<br>(4,33)    |                       | 0,0152<br>(3,33)     |                      |                    | -0,011<br>(-1,38) |                   |
| Une personne                | -2,3790<br>(-6,35)    | 0,5761<br>(1,98)   |                    | 0,0350<br>(4,46)    |                     |                       | -3,0505<br>(-10,30)  | 0,4495<br>(1,039)    |                    |                   | 1,735<br>(6,04)   |
| Deux personnes              | -1,6856<br>(-5,31)    |                    |                    | -1,5418<br>(-4,16)  |                     |                       | -2,4709<br>(-8,00)   |                      |                    |                   |                   |
| Plus de personnes           |                       |                    |                    | -0,6560<br>(-1,74)  | -0,8489<br>(-1,97)  |                       |                      |                      |                    |                   |                   |
| Vacance                     | 1,4990<br>(4,19)      | 0,5806<br>(3,35)   |                    | 1,0550<br>(5,82)    |                     |                       | 0,7351<br>(3,25)     |                      |                    | -1,629<br>(-2,22) |                   |
| Loisirs                     |                       |                    |                    |                     | -0,7292<br>(-3,39)  |                       |                      | -0,7734<br>(-2,98)   |                    |                   |                   |
| Visite                      |                       |                    |                    |                     |                     |                       |                      | 1,1246<br>(1,951)    |                    |                   |                   |
| Professionnel               |                       |                    | 2,2609<br>(6,67)   |                     |                     | 1,3415<br>(5,32)      |                      |                      | 1,3328<br>(9,31)   |                   |                   |
| Cadre supérieur             |                       |                    |                    | -0,5146<br>(-2,18)  | -0,7372<br>(-2,96)  |                       |                      | -0,6171<br>(-3,89)   |                    |                   |                   |
| Profession intermédiaire    | 1,5999<br>(4,64)      | 1,6635<br>(4,72)   |                    |                     |                     |                       | 0,5626<br>(3,68)     |                      |                    |                   |                   |
| Employé                     | 1,3763<br>(3,92)      | 1,1040<br>(3,23)   |                    |                     | -0,7078<br>(-3,44)  |                       | 0,9555<br>(4,78)     |                      |                    | 0,715<br>(1,72)   |                   |
| Ouvrier                     | 3,4766<br>(3,88)      | 2,2390<br>(2,41)   |                    |                     |                     |                       |                      |                      |                    | 0,661<br>(1,41)   |                   |
| Revenu 5 et 10              |                       | 0,8087<br>(1,921)  |                    | 1,0987<br>(1,74)    | 1,6580<br>(2,59)    |                       |                      | 0,4664<br>(2,07)     |                    | 0,7574<br>(1,77)  |                   |
| Revenu 10 et 13             | 1,7774<br>(2,26)      | 2,2493<br>(2,86)   |                    | 0,2651<br>(0,73)    | 0,3700<br>(0,93)    |                       |                      |                      |                    |                   |                   |
| Revenu 13 et 20             |                       |                    |                    |                     |                     |                       | 0,3073<br>(1,97)     |                      |                    |                   |                   |
| Log vraisemblance (0)       |                       | -2059              |                    |                     | -3539               |                       |                      | -2310                |                    |                   | -346              |
| Log vraisemblance (B)       |                       | -662               |                    |                     | -1220               |                       |                      | -784                 |                    |                   | -221              |



Pour un jugement de la qualité statistique des résultats et pour une comparaison avec le modèle conditionnel, on trouvera dans le tableau n°4.15 les tables de succès du modèle pour chacun des axes.

Tableau n° 4.15 : Tables de succès du modèle logit conditionnel pour chaque axes

| <i>Axe Sud-Est</i> |      |       |       |               |
|--------------------|------|-------|-------|---------------|
|                    | Auto | Train | Avion | Total observé |
| Auto               | 2312 | 79    | 19    | 2410          |
| Train              | 334  | 221   | 25    | 580           |
| Avion              | 57   | 59    | 116   | 232           |
| Total prévu        | 2703 | 359   | 160   | 3222          |

| <i>Axe Sud-Ouest</i> |      |       |       |               |
|----------------------|------|-------|-------|---------------|
|                      | Auto | Train | Avion | Total observé |
| Auto                 | 1431 | 44    | 14    | 1489          |
| Train                | 199  | 118   | 8     | 325           |
| Avion                | 15   | 7     | 39    | 61            |
| Total prévu          | 1645 | 169   | 61    | 1875          |

| <i>Axe ouest</i> |      |       |       |             |
|------------------|------|-------|-------|-------------|
|                  | Auto | Train | Avion | Total prévu |
| Auto             | 1664 | 73    | 10    | 1747        |
| Train            | 172  | 138   | 11    | 321         |
| Avion            | 11   | 5     | 19    | 35          |
| Total prévu      | 1847 | 216   | 40    | 2103        |

| <i>Axe Nord</i> |      |       |             |
|-----------------|------|-------|-------------|
|                 | Auto | Train | Total prévu |
| auto            | 340  | 28    | 368         |
| Train           | 69   | 63    | 132         |
| Total prévu     | 409  | 91    | 500         |

La segmentation par axe améliore la qualité de l'estimation. La prévision correcte du fer passe, pour l'ensemble des axes, de 508 à 560 déplacements tandis que celle de l'avion passe de 154 à 174 déplacements. Mais les gains obtenus restent faibles et ne compensent pas les problèmes soulevés par l'examen des coefficients estimés.

#### 4.2.3.2 Segmentation par motif

Nous avons d'abord estimé le modèle avec cinq motifs différents (professionnel, loisirs, vacances, visite et autre motif). Les résultats n'étaient pas concluants pour tous les motifs, ne serait-ce que par ce que certains d'entre eux étaient trop peu représentés pour permettre une estimation fiable. Nous avons alors procédé à des regroupements pour ne conserver que deux motifs principaux :

- Le motif professionnel,
- L'ensemble des motifs privés, regroupant les visites, les loisirs, les vacances et les autres motifs.

Nous avons ensuite réalisé une estimation d'un modèle logit conditionnel pour chacun des deux motifs retenus (tableau 4.16). Contrairement à la segmentation par axe, les problèmes de signe et de significativité ne se posent pas de façon aiguë. La segmentation par motifs est sans doute la plus discriminante vis-à-vis des comportements.

Sachant que, pour la plupart des déplacements ayant un motif professionnel, le décideur n'est pas la personne qui voyage mais son employeur, on peut s'attendre à un affaiblissement de l'impact des variables représentatives des caractéristiques de l'utilisateur, pouvant aller jusqu'à des effets estimés non significativement différents de zéro. C'est bien ce que l'on observe.

Pour ce qui est des caractéristiques du voyage, la plupart des déplacements professionnels s'effectuant généralement à une ou deux personnes, il n'était pas pertinent d'intégrer la variable correspondante dans le modèle. Reste la durée de séjour. Comme pour le modèle global, l'avion est beaucoup plus fréquemment choisi pour les déplacements de courte durée, au détriment à la fois du train et de la voiture.

En ce qui concerne le motif privé, on retrouve, au moins qualitativement, des résultats similaires à ceux auxquels nous étions parvenus antérieurement avec le modèle global.

**Tableau n° 4.16 : Résultats d'estimation du modèle logit emboîté par motifs**

|                                                 | Motif Professionnel |              |              |              |              |              | Motifs Privés |              |              |              |              |              |
|-------------------------------------------------|---------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|---------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
|                                                 | Voiture             |              | Train        |              | Avion        |              | Voiture       |              | Train        |              | Avion        |              |
|                                                 | Coefficients        | t de Student | Coefficients | t de Student | Coefficients | t de Student | Coefficients  | t de Student | Coefficients | t de Student | Coefficients | t de Student |
| <b>Caractéristiques de l'offre de transport</b> |                     |              |              |              |              |              |               |              |              |              |              |              |
| Coût de transport                               | -0,0089             | -5,37        | -0,0088      | -5,09        | -0,0017      | -2,53        | -0,0053       | -9,62        | -0,0078      | -10,43       | -0,0021      | -8,41        |
| Temps de transport                              | -0,0454             | -7,80        | -0,0284      | -7,98        | -0,0180      | -3,18        | -0,0215       | -10,72       | -0,0082      | -6,35        | -0,0446      | -8,33        |
| Temps de transport au carré                     | 0,0001              | 6,41         | 0,0000       | 5,28         | 0,0001       | 6,41         | 2,3E-05       | 7,50         | 2,5E-06      | 1,46         | 9,6E-05      | 6,74         |
| <b>Caractéristiques de l'individu</b>           |                     |              |              |              |              |              |               |              |              |              |              |              |
| Age                                             | 0,0575              | 3,73         | -0,0029      | -0,19        |              |              | 0,0256        | 10,80        | 0,0281       | 11,96        |              |              |
| Homme                                           | -0,7694             | -1,98        | -0,7414      | -1,97        |              |              | 0,1311        | 1,64         | 0,1241       | 1,51         |              |              |
| PCS (réf. Employé, agriculteur)                 |                     |              |              |              |              |              |               |              |              |              |              |              |
| Cadre supérieur                                 | -0,6671             | -1,49        | -1,0832      | -2,47        |              |              | -0,2808       | -2,62        | -0,5815      | -5,50        |              |              |
| Profession intermédiaire                        | 0,4423              | 0,99         | 0,6446       | 1,51         |              |              | -0,1988       | -2,01        | -0,5148      | -5,00        |              |              |
| Ouvrier                                         | 2,3687              | 2,88         | -0,7798      | -0,77        |              |              | 0,6106        | 3,10         | 0,4102       | 2,19         |              |              |
| Nombre de voitures                              | 0,3195              | 1,37         | -0,3020      | -1,38        |              |              | 0,0656        | 1,14         | -0,4609      | -7,68        |              |              |
| Revenu (réf. Revenu de + de 300 000 fr)         |                     |              |              |              |              |              |               |              |              |              |              |              |
| Revenu <70 000                                  | -0,1841             | -0,20        | -1,3295      | -1,42        |              |              | -0,0952       | -0,58        | -0,0912      | -0,62        |              |              |
| Revenu entre 70 000 et 130 000                  | 0,2212              | 0,43         | -0,1423      | -0,28        |              |              | 1,6992        | 11,10        | 1,4314       | 9,50         |              |              |
| Revenu entre 130 000 et 200 000                 | 0,5961              | 1,21         | -0,1237      | -0,25        |              |              | 0,6859        | 5,65         | 0,1244       | 1,04         |              |              |
| Revenu entre 200 000 et 300 000                 | -0,2314             | -0,68        | -0,3946      | -1,17        |              |              | 0,8642        | 7,95         | 0,8018       | 7,02         |              |              |
| Distance parcourue en voiture                   | -0,0125             | -1,41        | -0,0628      | -6,32        |              |              | 0,0041        | 1,22         | -0,0400      | -9,76        |              |              |
| <b>Caractéristiques du déplacement</b>          |                     |              |              |              |              |              |               |              |              |              |              |              |
| Taille du groupe (réf. +plus de deux pers)      |                     |              |              |              |              |              |               |              |              |              |              |              |
| Une personne                                    |                     |              |              |              |              |              | -1,6292       | -15,02       | 0,6743       | 5,93         |              |              |
| Deux personnes                                  |                     |              |              |              |              |              | -0,8408       | -8,70        | 0,4001       | 3,55         |              |              |
| Durée du séjour (réf. + de trois jours)         |                     |              |              |              |              |              |               |              |              |              |              |              |
| Une journée                                     | -1,3227             | -3,37        | -1,1100      | -2,89        |              |              | -2,2589       | -8,18        | -2,8159      | -9,22        |              |              |
| Deux jours                                      | -0,9763             | -2,36        | -1,3387      | -3,29        |              |              | 0,9607        | 3,75         | 0,7226       | 2,59         |              |              |
| Trois jours                                     | -0,7882             | -1,68        | -0,6130      | -1,31        |              |              | -0,8226       | -7,33        | -0,7747      | -6,81        |              |              |
| Constante                                       | 7,1459              | 4,17         | 8,9673       | 5,26         |              |              | 1,0003        | 1,73         | -1,6294      | -2,79        |              |              |
| Nombre d'observations                           |                     |              |              |              |              |              | 4739          |              |              |              |              |              |
| Log Vraisemblance à zéro                        |                     |              |              |              |              |              | -5206         |              |              |              |              |              |
| Log Vraisemblance de Béta                       |                     |              |              |              |              |              | -2341         |              |              |              |              |              |

Le tableau n°4.17 donne les tables de succès par motifs et nous permet de juger de la qualité prévisionnelle des estimations.

**Tableau n° 4.17 : Tables de succès du modèle logit pour chaque motif**

***Motif professionnel***

|                                   | Voiture     | Train      | Avion      | Total observé |
|-----------------------------------|-------------|------------|------------|---------------|
| Voiture                           | 915         | 169        | 21         | 1104          |
| Train                             | 172         | 237        | 32         | 441           |
| Avion                             | 21          | 25         | 107        | 154           |
| <b>Total prévu</b>                | <b>1108</b> | <b>431</b> | <b>160</b> | <b>1699</b>   |
| Pourcentage de prévision correcte | 83%         | 54%        | 69%        | 74%           |

***Motif privé***

|                                   | Voiture     | Train       | Avion      | Total observé |
|-----------------------------------|-------------|-------------|------------|---------------|
| Voiture                           | 3107        | 581         | 140        | 3828          |
| Train                             | 305         | 381         | 81         | 767           |
| Avion                             | 33          | 39          | 72         | 144           |
| <b>Total prévu</b>                | <b>3446</b> | <b>1001</b> | <b>293</b> | <b>4739</b>   |
| Pourcentage de prévision correcte | 81%         | 50%         | 50%        | 75%           |

Nous constatons que dans le cas des motifs privé et professionnel, nous obtenons une sensible amélioration de la prévision des modes fer et aérien. Ce résultat est beaucoup plus net pour le motif professionnel, nous obtenons des prévisions correctes de l'ordre de 69% pour l'aérien et de 54% pour le fer.

En conclusion, la segmentation par motif nous permet de gagner à la fois en lisibilité sur la compréhension du comportement de choix modal et en qualité de prévision du modèle. Nous devons tenir compte de ce résultat lors de l'analyse de la valeur du temps dans le chapitre 6.

### 4.3 Agrégation des résultats désagrégés

Dans la planification et l'évaluation du système de transport, l'objectif final de la modélisation est de prévoir et d'examiner la sensibilité de la demande de transport correspondante aux changements de variables dites politiques. Cependant, la prévision des comportements de choix modal par le modèle désagrégé ne s'avère pas directement utilisable pour cet objectif. Car, dans la pratique, la décision de transport doit être basée sur une prévision de la demande agrégée en vue de représenter les comportements d'un groupe d'individus. Un lien entre le modèle désagrégé et les prévisions agrégées devient dès lors nécessaire. Il s'agit de déterminer quelle méthode d'agrégation utiliser.

#### 4.3.1 Méthode d'agrégation directe

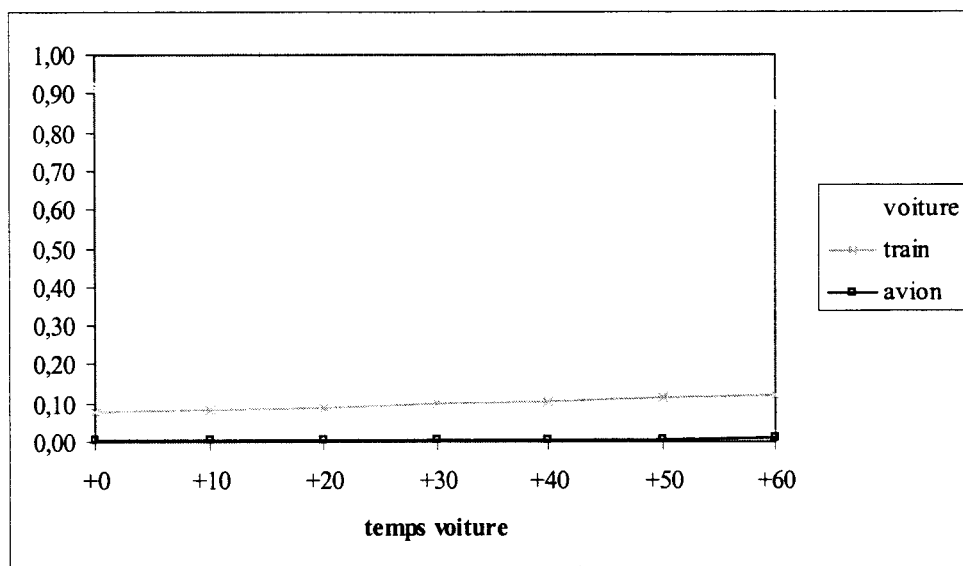
La procédure la plus simple est la méthode d'agrégation directe ou dite « naïve ». On prend comme variables explicatives du modèle les valeurs moyennes du groupe concerné, que l'on utilise pour le calcul des probabilités de choix. Malheureusement, bien que simples, les prévisions effectuées par cette approche sont imprécises et biaisées dans le cas des modèles non linéaires, comme le modèle logit et probit, pour des raisons que nous préciserons plus loin. Cette méthode étant cependant utilisée, il nous paraît utile d'en présenter les résultats.

Le graphique n°4.3 montre en effet les résultats de la méthode d'agrégation directe sur le calcul des parts modales du train, de la voiture et de l'avion en fonction du temps voiture. Le modèle utilisé est le modèle logit conditionnel. Les effectifs observés sur lesquels reposent les paramètres et les valeurs moyennes des paramètres utilisés sont les mêmes que dans la première partie.

Si l'on pouvait se fier à ces évaluations, elles confirmeraient l'importance des possibilités de report modal entre la voiture et le train. De manière logique, la part de la voiture décroît régulièrement avec le temps de transport en voiture. Une augmentation d'une heure de ce dernier fait baisser la part modale de l'automobile de 92% à 87%. C'est le train qui est le

principal bénéficiaire de ces changements. Sa part modale augmente fortement, l'augmentation d'une heure du temps voiture la faisant passer de 8% à 12%, soit un tiers de trafic en plus.

**Graphique n° 4.3 : évolution des parts modales en fonction du temps voiture**  
**Méthode d'agrégation directe à partir du modèle logit conditionnel**



On notera également que ces évaluations posent un problème de niveau : la part modale prévue pour la route par cette méthode est de 92%, alors qu'elle n'est que de 78% dans l'échantillon.

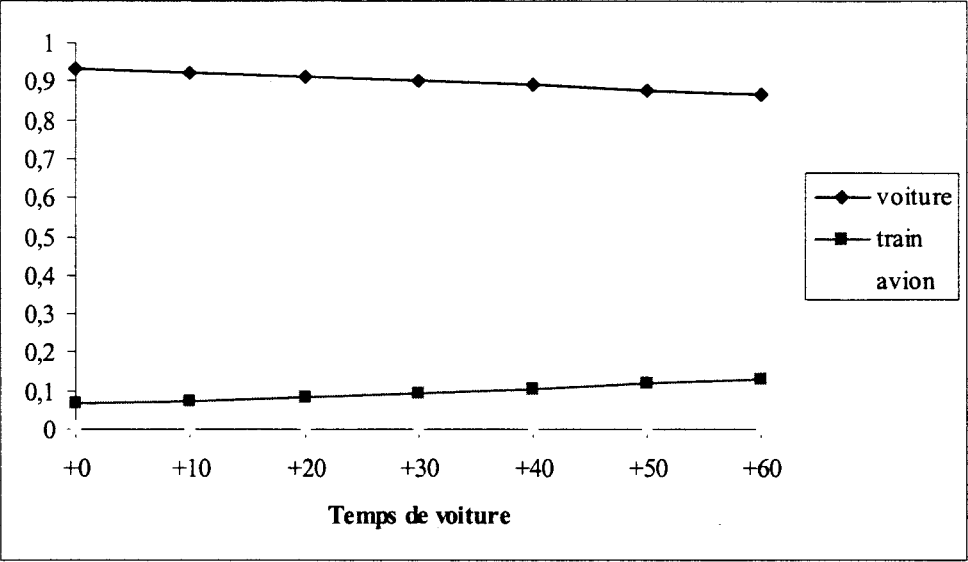
Il semble donc que la méthode d'agrégation directe surestime fortement les parts modales de la voiture. Cette surestimation se fait à la fois au détriment du train et de l'avion. Ce constat est à relier au biais inhérent à la méthode, dont nous préciserons l'ampleur et la nature dans la section suivante. Il rend peu crédible les projections faites avec cette méthode.

Le graphique n°4.4 montre le résultat de la méthode d'agrégation directe sur le calcul des parts modales du train, de la voiture et de l'avion en fonction du temps voiture. Le modèle utilisé est maintenant le modèle logit avec une spécification logarithmique du temps.

Globalement, on parvient aux mêmes conclusions. On retrouve l'importance des reports modaux de la voiture vers le train quand le temps de transport en voiture augmente. Mais,

dans le détail, les différences sont importantes. D'une part, les reports modaux sont de plus grande ampleur. C'est ainsi qu'une augmentation du temps de transport voiture d'une heure fait maintenant passer la part modale du fer de 7% à près de 13%, soit un quasi-doublement du trafic. D'autre part, la surestimation de la part modale de la voiture dégrade encore plus les autres parts modales. Ainsi, la part modale estimée pour l'avion est proche de zéro.

**Graphique n° 4.4 : évolution des parts modales en fonction du temps voiture**  
**Méthode d'agrégation directe à partir du modèle logit logarithmique**



### 4.3.2 Méthode d'énumération complète

La méthode la plus fiable d'agrégation des estimations du modèle de choix désagrégé est la méthode d'énumération complète. On prévoit la probabilité pour chaque déplacement en utilisant le modèle désagrégé. Ensuite, on calcule la valeur moyenne des probabilités prévues comme pour la prévision agrégée.

Soit un groupe d'individus à analyser, repéré par l'indice  $T$ , de taille  $N_T$ . La probabilité qu'un individu  $n$  du groupe choisisse l'alternative  $i$  est définie comme  $P(i / x_n)$ , où  $x_n$  est le vecteur des valeurs des variables explicatives. Le nombre attendu d'individus du groupe  $T$  choisissant l'alternative  $i$ ,  $N_T(i)$ , est :

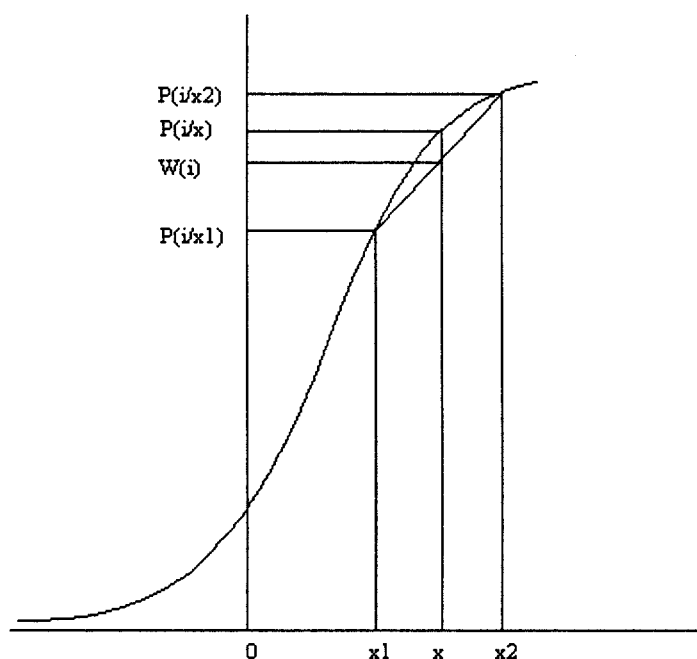
$$N_T(i) = \sum_{n=1}^{N_T} P(i / x_n)$$

La part modale de l'alternative  $i$  pour le groupe T est :

$$P(i) = \frac{1}{N_T} \sum_{n=1}^{N_T} P(i / x_n) = E[P(i / x)]$$

Le graphique 4.5 permet d'expliquer simplement l'origine de l'erreur à laquelle conduit l'usage de la méthode d'agrégation naïve, en l'illustrant sur un groupe qui comprend seulement deux individus de caractéristiques  $x_1$  et  $x_2$ ,  $x$  désignant la valeur moyenne :

**Graphique n° 4.5 : Erreur d'agrégation**



La probabilité agrégée prévue par la méthode d'agrégation directe est égale à :

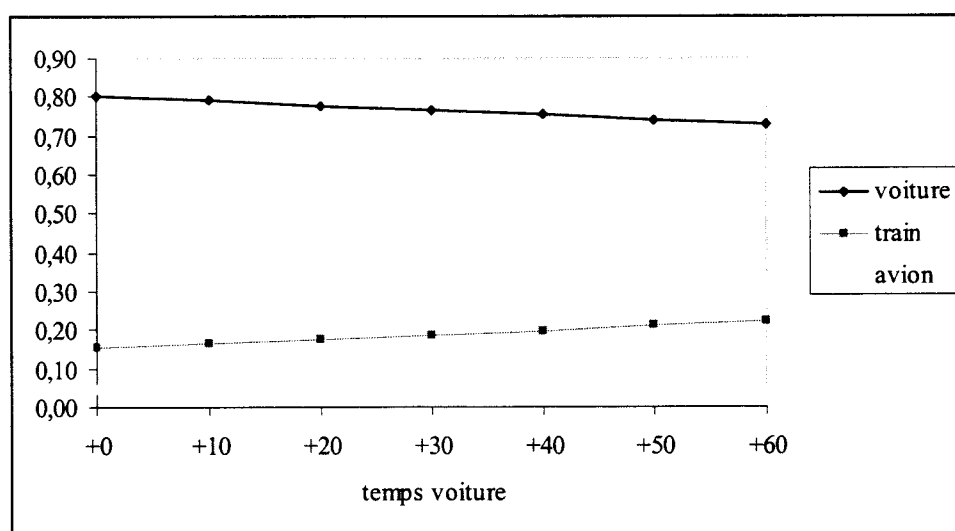
$$P(i) = \frac{P(i / x_1) + P(i / x_2)}{2}$$

La probabilité agrégée prévue par la méthode « naïve » est égale à  $P(i / x)$ . On observe sur le graphique ci-dessus que  $P(i) < P(i / x)$ , ce qui est une conséquence triviale de la concavité de la fonction logit en ce point. La différence d'agrégation  $P(i / x) - P(i)$  est ce que l'on appelle l'erreur d'agrégation. Ce type d'erreur est dû au fait que tous les voyageurs ne possèdent pas les mêmes attributs individuels ou les mêmes attributs des alternatives de choix.



Le graphique 4.6 ci-dessous présente les résultats de la méthode d'énumération complète, appliquée au modèle logit conditionnel. Les populations et les valeurs de départ étant les mêmes, on peut les comparer au graphique 5.4.

**Graphique n° 4.6 : évolutions des parts modales en fonction du temps voiture**  
**Méthode d'énumération complète à partir du modèle logit conditionnel**



Comme prévu, on constate des différences très importantes avec la méthode « naïve ». Ces différences portent d'abord sur les niveaux moyens des parts modales prévues : 80% pour la voiture, 15% pour le train et 5% pour l'avion. Ces valeurs sont très proches des parts observées et sont donc plus réalistes, ce qui laisse à penser que les résultats peu acceptables de la méthode d'agrégation naïve étaient bien la conséquence d'un biais d'agrégation.

Par ailleurs, la sensibilité du choix modal au temps de déplacement apparaît nettement plus faible que précédemment. Les parts modales voiture ne baissent que faiblement avec une augmentation d'une heure du temps de déplacement voiture. On retrouve cependant l'importance des reports modaux vers le train quand le temps de transport en voiture augmente.

### 4.3.3 Méthode TALVITIE (1973)

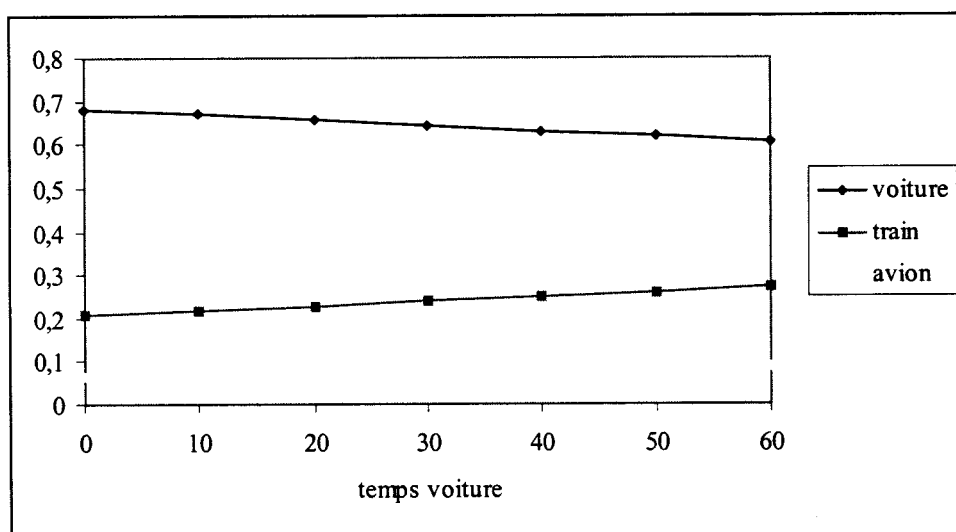
Cette méthode approximative consiste à prendre l'expansion de la série de Taylor de la probabilité de choix autour de la valeur moyenne des variables explicatives, pour ensuite ne retenir que les trois premiers termes de la série. On obtient ainsi une approximation de second ordre. Plus précisément, on a :

$$P(i) \cong P(i / \bar{x}) + \frac{1}{2} \sum_{r=1}^R \sum_{r'=1}^R \frac{\partial^2 P(i / x)}{\partial x_r \partial x_{r'}} \bigg|_{\bar{x}} \text{cov}(x_r, x_{r'})$$

Ainsi, la part modale prévue par la méthode d'énumération complète devrait être approximativement égale à la part prévue par la méthode d'agrégation directe (méthode naïve) plus un terme correcteur, qui dépend conjointement de la variance de l'échantillon et de la valeur prévue par la méthode naïve.

Nous avons appliqué la méthode d'agrégation Talvitie à un modèle logit conditionnel portant sur l'ensemble des observations. On en trouvera les résultats sur le graphique 4.7.

**Graphique n° 4.7 : évolution des parts modales en fonction du temps voiture, Méthode d'agrégation Talvitie à partir du modèle logit conditionnel**



La correction apportée par la méthode Talvitie est très importante et s'effectue dans le bon sens. La part modale de la voiture passe de 90% à 70%, le train passe de 8% à 20% et l'avion de 1% à 6%. Ces valeurs sont plus réalistes que celles obtenues par la méthode naïve. Cependant, par rapport à la méthode d'énumération complète, on sous-estime la part de la

voiture, on surestime légèrement la part modale train mais on obtient des résultats cohérents pour l'avion. La sensibilité du choix modal au temps de déplacement de la voiture apparaît nettement plus faible qu'avec la méthode d'agrégation naïve, tout en restant plus élevée qu'avec la méthode d'énumération complète. L'augmentation d'une heure du temps de déplacement en voiture entraîne une augmentation sensible de la part modale du train (elle passe de 20% à 27%).

Par ailleurs, l'utilisation de la méthode d'agrégation Talvitie aboutit à une somme des parts modales inférieure à l'unité : celle-ci est égale à 95%. Il s'agit d'un problème important, inhérent à la méthode elle-même, car on rajoute un terme correcteur différent d'une part à l'autre, sans aucune garantie que la somme des parts modales soit conservée.

#### 4.3.4 Intégration explicite

Si l'on peut connaître la distribution des variables explicatives,  $p(x)$ , on peut utiliser cette distribution pour passer de la prévision des choix modaux individuels à la prévision des parts modales.

$$W(i) = \int_x P(i/x)P(x)dx$$

L'approche la plus directe consiste évidemment à résoudre cette intégrale. Cependant, une approche plus simple analytiquement est de considérer la différence  $\bar{\varepsilon}_{in} = x_{in} - \bar{x}_i$  comme la source des erreurs aléatoires observables en raison du processus d'agrégation. Cette définition nous permet d'écrire la fonction d'utilité sous la forme :

$$U_{in} = \beta' x_{in} + \varepsilon_{in} = \beta' \bar{x}_i + (\beta' \bar{\varepsilon}_{in} + \varepsilon_{in})$$

et donc la probabilité que l'alternative  $i$  soit choisie par un individu quelconque est donnée par :

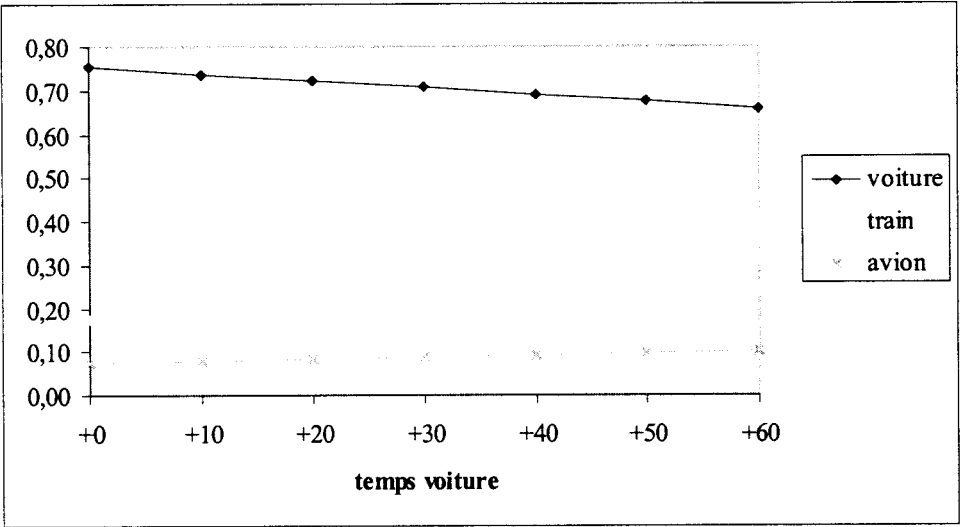
$$P(i) = P(\bar{V}_i + \varepsilon_{in}^* \geq \bar{V}_j + \varepsilon_{jn}^*, \forall n \in C)$$

Si le vecteur des variables indépendantes  $x$  et les termes d'erreur  $\varepsilon_n$  suivent une distribution normale, alors les  $\varepsilon_{in}^*$  suivront aussi une distribution normale et l'expression  $P(i)$  s'interprète bien comme une probabilité agrégée.

Le graphique 4.8 ci-dessous présente les résultats de la méthode d'intégration explicite, appliquée au modèle logit conditionnel. Les populations et les valeurs de départ étant les mêmes, on peut les comparer aux graphiques 4.6 et 4.7.

Les résultats de la méthode d'intégration explicite et de la méthode d'énumération complète sont très proches les uns des autres. On retrouve ici les mêmes sensibilités à une baisse d'une heure du temps de transport en voiture. La modification du temps de transport en voiture entraîne cette fois-ci des reports de la voiture vers le train et l'avion, contrairement aux méthodes précédentes, avec lesquelles la part modale de l'avion ne subissait aucune modification suite à une augmentation d'une heure de temps de transport en voiture. Ici, elle passe de 7% à 10%. Ce résultat est sans doute trop fort pour être crédible. On préférera donc la méthode d'énumération complète, mais qui reste très lourde à mettre en œuvre. Une solution pour alléger les calculs consiste à utiliser la méthode de l'énumération de l'échantillon aléatoire.

**Graphique n° 4.8 : évolution des parts modales en fonction du temps voiture**  
**Méthode d'intégration explicite à partir du modèle logit conditionnel**



### 4.3.5 Enumération d'échantillons aléatoires

La méthode d'énumération d'échantillons aléatoires utilise un échantillon aléatoire d'individus considéré comme représentatif de l'ensemble des individus. Le partage modal prévu par cet échantillon est considéré comme une bonne estimation du résultat auquel on parviendrait avec la méthode d'énumération complète :

$$P(i) = \frac{1}{N_s} \sum_{n=1}^{N_s} P(i / x_n)$$

où  $N_s$  est le nombre d'individus.

La méthode d'énumération d'échantillons aléatoires peut être aussi utilisée dans le cas d'échantillons non aléatoires. Supposons que parmi les individus de groupes différents, des individus soient sélectionnés aléatoirement. On peut donc appliquer l'approche à chaque groupe. L'estimation du partage modal,  $P(i)$  est égale à la somme pondérée de la prévision de chaque groupe :

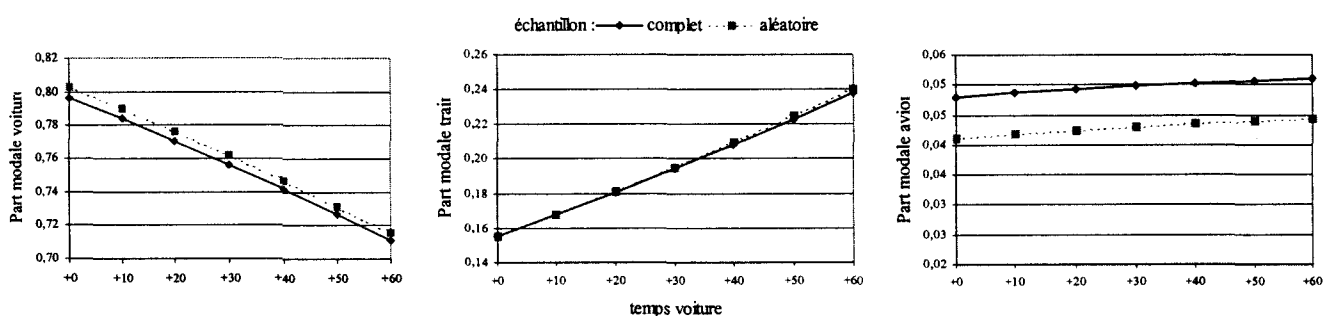
$$P(i) = \sum_{g=1}^G \left( \frac{N_g}{N_t} \right) \frac{1}{N_{sg}} \sum_{n=1}^{N_{sg}} P(i / x_n)$$

où  $N_{sg}$  est la taille de groupe  $g$  et  $N_g$  est l'estimation du nombre total d'individus dans ce groupe.

Sur les 7 700 déplacements, nous en avons tiré aléatoirement un millier, soit environ 13% des déplacements totaux.

Les graphiques 4.9 ci-dessous présentent les résultats de la méthode d'intégration d'échantillon aléatoire, appliquée au modèle logit conditionnel.

**Graphique n° 4.9 : Comparaison entre la méthode d'agrégation complète et l'énumération d'échantillon aléatoire, sur l'évolution des différentes parts modales :**



La méthode de l'énumération d'échantillon aléatoire permet de conserver les mêmes propriétés que la méthode d'agrégation directe :

- les parts modales sont très proches des valeurs observées (cf. tableau 1.10),
- on obtient les mêmes sensibilités sur l'ensemble des parts modales suite à une augmentation d'une heure du temps voiture.

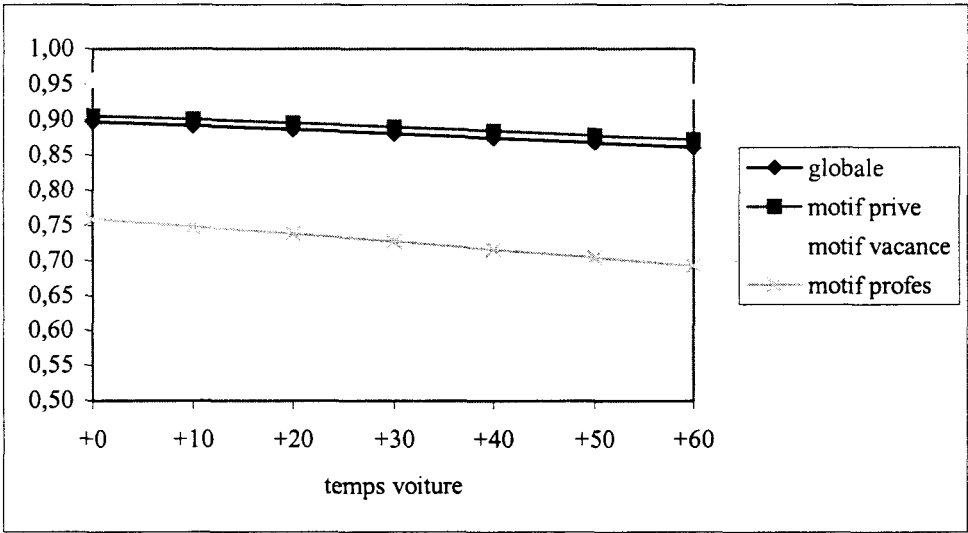
La sélection d'un échantillon de taille beaucoup plus faible que la population étudiée permet donc bien d'obtenir des estimations agrégées satisfaisantes.

### 4.3.6 Segmentation de marché

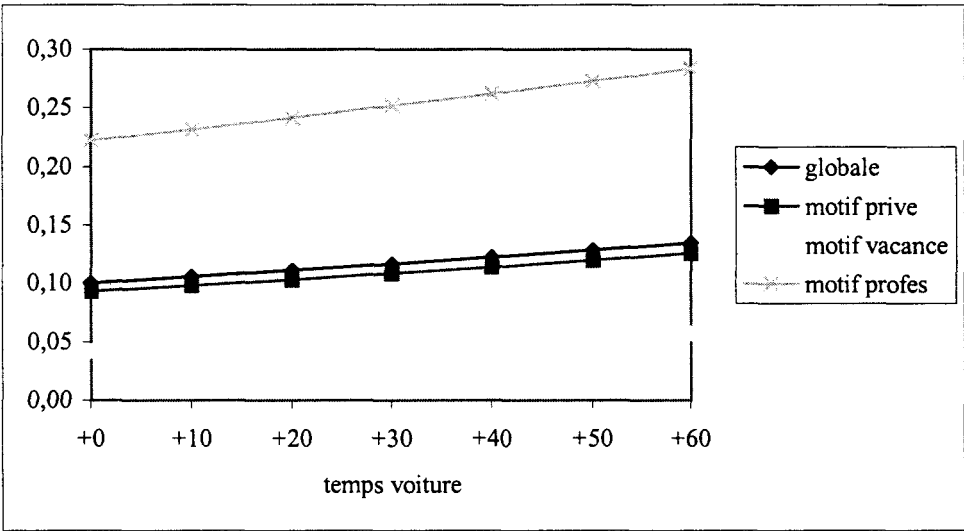
Cette méthode est simplement une extension logique de la méthode « naïve ». Etant donné que le résultat de la méthode naïve est imprécis quand la distribution des variables  $x$  a une variance élevée, cette approche essaie de regrouper les déplacements en segments de marché à l'intérieur desquels la variance de l'utilité des individus est minimisée, et entre lesquelles elle est maximisée. Ensuite on appliquera simplement la méthode directe (naïve) à chaque groupe. Le partage modal agrégé est finalement obtenu en prenant la valeur moyenne des probabilités de chaque segment de marché pondérée par les probabilités qu'un déplacement relève de l'un ou l'autre des segments de marché. La diminution de la variance de l'utilité va réduire le biais d'agrégation résultant de l'utilisation des valeurs moyennes des variables indépendantes pour chaque segment de marché.

Les graphiques n°4.10 à 4.12 montrent les résultats de la méthode d'agrégation par segmentation du marché sur le calcul des parts modales de la voiture, du train et de l'avion en fonction du temps voiture. Le modèle utilisé est maintenant le modèle logit conditionnel.

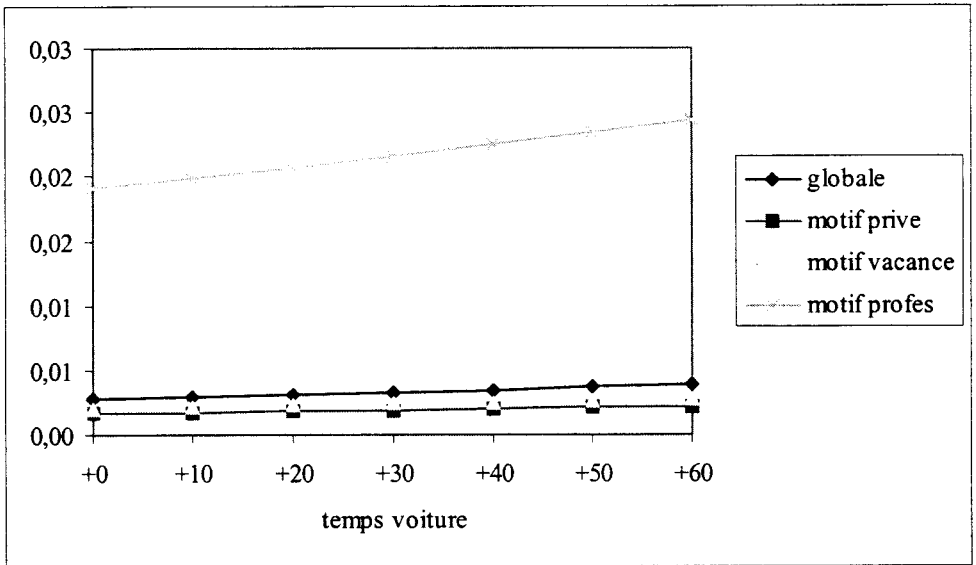
**Graphique n° 4.10 : parts modales de la voiture en fonction du temps voiture, par motif**  
**Méthode de segmentation du marché à partir du modèle logit conditionnel**



**Graphique n° 4.11 : parts modales du train en fonction du temps voiture, par motif**  
**Méthode de segmentation du marché à partir du modèle logit conditionnel**



**Graphique n° 4.12 : parts modales de l'avion en fonction du temps voiture, par motif**  
**Méthode de segmentation du marché à partir du modèle logit conditionnel**



La méthode d'agrégation par segmentation du marché repose sur la méthode naïve. Elle n'arrive pas à en corriger les principaux problèmes. On notera également que ces évaluations posent un problème de niveau : les parts modales avion sont quel que soit le motif généralement sous-estimées, et donc inversement, les parts modales de la voiture sont surestimées.



## 4.4 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons pu établir que la fonction d'utilité est d'une forme non-linéaire. Celle-ci est de nature quadratique sur le temps de transport. L'analyse des méthodes d'estimations, nous a conduit à préférer le modèle logit emboîté. En effet, celui-ci permet de corriger le biais associé à l'hypothèse d'indépendance des alternatives non pertinentes, et il améliore la prévision du choix de mode transport.

La segmentation par motifs de déplacement (privé et professionnel), nous a permis d'une part d'améliorer les prévisions liées aux choix du mode de transport, et d'autre part de mettre en lumière la nette divergence qui existe entre ces deux motifs sur les déplacements de longue distance.

Enfin, l'étude des méthodes d'agrégation nous a amenés à retenir pour les prévisions la méthode d'énumération d'échantillons aléatoires.

Riche de ces constats, nous pouvons maintenant nous intéresser à l'évaluation de la valeur du temps.

## **CHAPITRE 5**

### **EVALUATION DE LA VALEUR DU TEMPS**

Ce chapitre sera essentiellement consacré à l'évaluation de la valeur du temps des voyageurs sur des déplacements longue distance. Nous allons analyser les différentes propositions concernant la forme fonctionnelle de la valeur du temps. Comme il est difficile de départager ces différentes formes fonctionnelles sur le plan théorique, nous nous appuierons sur les résultats des tests économétriques afin de les classer selon leur degré de pertinence par rapport au problème traité. Nous allons donc utiliser un modèle logit conditionnel pour estimer les différentes fonctions d'utilité indirectes examinées au chapitre 2. Au sein de ces différentes spécifications, nous n'utiliserons que les variables d'offre et de revenu<sup>18</sup>.

Ce chapitre se décompose en deux parties. Dans la première partie, nous testerons les différents modèles présentés dans le chapitre 1. Nous présenterons les résultats d'estimations simples où seules sont introduites les variables de temps, de coût et éventuellement de revenu. Ces estimations sont réalisées à l'aide d'une méthodologie économétrique homogène permettant la comparaison. Nous calculerons à chaque fois les valeurs du temps auxquelles conduisent ces estimations puis nous les comparerons. Dans la seconde partie, nous partirons des modèles les plus pertinents pour intégrer l'ensemble des facteurs permettant, conformément aux conclusions du chapitre 4, de parvenir à un modèle de choix modal satisfaisant. Nous comparerons à nouveau les valeurs du temps qui résultent de ces différentes estimations.

---

<sup>18</sup> Les autres variables n'étant pas utiles pour l'instant, elles ne seront pas prises en compte.

Mais au préalable, nous présentons ci-dessous les résultats disponibles sur la valeur du temps des voyageurs dans le cas français au sein d'un tableau tiré du rapport Boiteux (2001).

**Tableau n° 5.1 : (valeur du temps en F/heure/voyageur)**

| Grandeur                                                      | VdT<br>Moyenne<br>(> 80 km) |      | VdT<br>Moyenne<br>(dist. Variable) |      | VdT<br>« Idrac »         |      | VdT<br>SETRA           |      | VdT<br>SNCF            |
|---------------------------------------------------------------|-----------------------------|------|------------------------------------|------|--------------------------|------|------------------------|------|------------------------|
| Outil d'application                                           | MATISSE                     |      | MATISSE                            |      | Multiples                |      | ARIANE                 |      | Gravitaire<br>SNCF     |
| Champ d'application                                           | Modèle trafic               |      | Modèle trafic                      |      | Evaluation<br>économique |      | Trafic +<br>Evaluation |      | Trafic +<br>Evaluation |
| Année d'établis.                                              | 1988                        |      | 1997                               |      | 1995                     |      | 1995                   |      | 1998                   |
| Valeur (année)                                                | 1990                        | 1998 | 1996                               | 1998 | 1994                     | 1998 | 1994                   | 1998 | 1998                   |
| Voiture particulière                                          | 71                          | 82   | 81                                 | 82   | 41                       | 43   | 41                     | 43   | -                      |
| Train                                                         | -                           | -    | 94                                 | 96   | -                        | -    | -                      | -    | -                      |
| Train 2 <sup>e</sup> classe                                   | 63                          | 73   | -                                  | -    | 64                       | 68   | -                      | -    | 71                     |
| Train 1 <sup>re</sup> classe                                  | 188                         | 218  | -                                  | -    | 163                      | 172  | -                      | -    | 180                    |
| Avion/train                                                   | 230                         | 266  | -                                  | -    | 289                      | 305  | -                      | -    | n.d.                   |
| Avion                                                         | 310                         | 359  | 256                                | 261  | -                        | -    | -                      | -    | -                      |
| Autres paramètres que le temps dans les avantages des usagers | Environ<br>50 %             |      | Environ<br>50 %                    |      | n.d.                     |      | Environ<br>30 %        |      | Environ<br>20 %        |
| Source                                                        | CGP Boiteux <sup>19</sup>   |      | INRETS <sup>20</sup>               |      | « Idrac » <sup>21</sup>  |      | SETRA <sup>22</sup>    |      | SNCF <sup>23</sup>     |

### 5.1 Evaluation de la valeur du temps

La non disponibilité de certaines variables dans l'enquête transport nous conduit à faire des choix au niveau des modèles théoriques. Nous ne pouvons tester économétriquement tous les modèles présentés dans le chapitre 1. Par exemple, Train et McFadden (1978) mettent en évidence le lien entre la valeur du temps et le taux de salaire. Les études anglo-saxonnes s'appuient sur ce postulat (Wardman, 1998). Malheureusement, en France, au niveau interurbain, nous ne disposons des données concernant le taux de salaire.

<sup>19</sup> Extrait du rapport du CGP, « Transports, pour un meilleur choix des investissements », 1994, page 36.

<sup>20</sup> Extrait du document technique INRETS « Modèle MATISSE. Test de la version du 14/05/07 », juillet 1997, pages 147 et suivantes.

<sup>21</sup> Extrait de l'instruction-cadre jointe à la circulaire du 3 octobre 1995 du secrétaire d'Etat aux Transports, annexe 1.

<sup>22</sup> Instruction relative aux méthodes d'évaluation économique des investissements routiers en rase campagne, septembre 1998, annexe 7, page 4.

<sup>23</sup> Entretiens réalisés en novembre 1999 (d'après Boiteux, 2000).

Cette contrainte de disponibilité des données nous a conduit à tester les modèles théoriques suivants :

- les modèles microéconomiques de Becker (1965) et De Serpa (1971, 1973) adaptés à l'analyse économétrique par Truong et Hensher (1985a) et Bates (1987),
- la proposition de Truong et Hensher (1985b), qui consiste en une extension du modèle de De Serpa avec une utilité marginale fonction du temps et du coût de transport,
- le modèle de Jara-Diaz et Videla (1989), qui nous permet de tester l'existence d'un lien entre la valeur du temps et le revenu,
- le modèle de Causse (1999), qui propose une valeur du temps fonction de la durée du trajet, du coût de transport et du revenu de l'utilisateur.

### 5.1.1 Confrontation du modèle de Becker et De Serpa

Nous allons tout d'abord comparer les résultats d'estimation de la valeur du temps obtenus avec le modèle Becker (1965) et celui de De Serpa (1971, 1973). Pour cela, nous allons adopter la démarche proposée par Truong et Hensher (1985a et 1985b) complétée par Bates. (1987).

#### 5.1.1.1 Le Modèle de Becker (1965)

La fonction d'utilité indirecte conditionnelle au mode  $i$  du modèle de Becker est de la forme suivante :

$$v_i = \beta_i - \lambda C_i - \mu T_i$$

On en déduit une valeur du temps :  $VTD_i = \frac{\partial v_i / \partial T_i}{\partial v_i / \partial C_i} = \frac{\mu}{\lambda}$ , qui est la même pour tous les modes de transport. Pour l'obtenir, il suffit de fixer les paramètres du modèle logit conditionnel. Les valeurs estimées sont données dans le tableau 5.2 ci-dessous.

Tableau n° 5.2 : fonction d'utilité indirecte de type Becker

| Variables explicatives    | Coefficients | t de Student |
|---------------------------|--------------|--------------|
| Coût de transport (F)     | -0,0044      | -22,34       |
| Temps de transport (min)  | -0,0097      | -22,88       |
| Constante pour la voiture | -2,59        | -9,11        |
| Constante pour le train   | -4,46        | -14,65       |
| Valeur du temps (fr/h)    | 131          |              |
| Nombre d'observations     | 7607         |              |
| Log Vraisemblance à zéro  | -8357        |              |
| Log Vraisemblance de Béta | -3731        |              |

Les coefficients associés aux variables coût et temps de transport ont les signes attendus. De plus, ils sont très hautement significatifs. Nous pouvons procéder à l'évaluation de la valeur du temps du modèle de Becker. Elle se calcule de la manière suivante :

$$VT = 60 \times (-0,0097/-0,0044) = 131 \text{ Fr/h}$$

5.1.1.2 Modèle de De Serpa

Contrairement à Becker (1965), De Serpa (1971, 1973) aboutit à une utilité marginale du temps, et donc à une valeur du temps, qui dépend du mode de transport. Comme nous l'avons vu au chapitre 2, en introduisant des contraintes reliant le temps et le coût de transport, il aboutit à une fonction d'utilité indirecte de la forme suivante :

$$v_i = \beta_i - \lambda C_i - k_i T_i$$

dont on déduit l'expression de la valeur du temps  $VT D_i = \frac{\partial v_i / \partial T_i}{\partial v_i / \partial C_i} = \frac{k_i}{\lambda}$ .

Concrètement, l'estimation du modèle De Serpa ne diverge de celle du modèle de Becker que par l'intégration du temps de transport d'une manière spécifique dans les différentes fonctions d'utilités. Les résultats d'estimation de ce modèle sont présentés dans le tableau n°5.3 ci-dessous.

Tableau n° 5.3 : Estimation du modèle de De Serpa

| Variables explicatives    | Voiture      |              | Train        |              | Avion        |              |
|---------------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
|                           | Coefficients | t de Student | Coefficients | t de Student | Coefficients | t de Student |
| Coût de transport (F)     | -0,0026      | -10,03       | -0,0026      | -10,03       | -0,0026      | -10,03       |
| Temps de transport (min)  | -0,0123      | -23,95       | -0,0087      | -20,35       | -0,0088      | -4,47        |
| Constante                 | 0,6480       | 1,33         | -1,7247      | -3,69        |              |              |
| Valeur du temps (fr/h)    | 280          |              | 199          |              | 201          |              |
| Nombre d'observations     | 7607         |              |              |              |              |              |
| Log Vraisemblance à zéro  | -8357        |              |              |              |              |              |
| Log Vraisemblance de Béta | -3689        |              |              |              |              |              |

Les estimateurs des coefficients sont très significatifs. On constate également des différences sensibles entre les coefficients du temps de transport pour chacun des modes. En effet, cette valeur est de -0,0123 pour la voiture et de -0,009 pour le train et l’avion. La différence la plus importante est donc évidente entre la voiture et les deux autres modes de transport. Il est facile de tester la significativité de cette différence en faisant un test de rapport de vraisemblance. Ce dernier rejette très nettement l’hypothèse nulle d’une égalité des coefficients du temps entre modes (voir encadré n°1).

Encadré n° 1 : test de rapport de vraisemblance

H0 : les  $k_i$  sont tous égaux  
Test du rapport de vraisemblance :  $LR=2*(-3689+3731) = 84 > \chi^2(2)= 5,99$   
Nous rejetons l’hypothèse H0, les  $k_i$  sont tous significativement différents les uns des autres.

Les valeurs du temps obtenues sont toutes supérieures à celle de Becker. De plus, la valeur du temps de la voiture est très élevée (280 Fr./h) et supérieure à celles du train et de l’avion (environ 200 Fr./h), ce qui est contraire à nos attentes. Ces résultats sont peu crédibles.

Il nous semble que ce résultat découle de l’hypothèse restrictive portant sur le coût de transport. Il est difficile d’imaginer que la perception du coût de transport soit la même d’un mode à l’autre. Nous proposons donc de relâcher cette contrainte, ce que confirme le test de rapport de vraisemblance, puisque les paramètres du coût de transport sont tous significativement différents les uns des autres. Nous trouverons les résultats d’estimation dans le tableau n°5.4.

**Tableau n° 5.4 : estimation du modèle de De Serpa avec un effet du coût de transport spécifique à chaque mode**

| Variables explicatives    | Voiture      |              | Train        |              | Avion        |              |
|---------------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
|                           | Coefficients | t de Student | Coefficients | t de Student | Coefficients | t de Student |
| Coût de transport         | -0,0058      | -10,66       | -0,0020      | -3,99        | -0,0018      | -5,92        |
| Temps de transport        | -0,0059      | -5,55        | -0,0076      | -18,90       | -0,0105      | -5,15        |
| Constante                 | 1,6064       | 3,12         | -0,6811      | -1,32        |              |              |
| Valeur du temps (fr/h)    | 61           |              | 228          |              | 357          |              |
| Nombre d'observations     | 7607         |              |              |              |              |              |
| Log Vraisemblance à zéro  | -8357        |              |              |              |              |              |
| Log Vraisemblance de Béta | -3665        |              |              |              |              |              |

Nous constatons bien que l’effet du coût de transport est différent d’un mode à l’autre. En effet, cette valeur est respectivement de  $-0,0058$ , pour la voiture et de  $-0,002$  pour le train et l’avion. Ces différences sont confirmées par le test du rapport de vraisemblance, qui conclut très nettement au rejet de l’hypothèse nulle d’une égalité de ces coefficients (encadré n° 2).

**Encadré n° 2 : test de rapport de vraisemblance**

|                                                                                                          |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| H0 : les $\lambda_i$ sont tous égaux                                                                     |
| Test du rapport de vraisemblance : $LR=2*(-3665+3689) = 48 > \chi^2(2)= 5,99$                            |
| Nous rejetons l’hypothèse H0, les $\lambda_i$ sont tous significativement différents les uns des autres. |

Les valeurs du temps sont dans des ordres de grandeurs proches de celles observées. La valeur du temps de la voiture est plus faible que celle du train, qui est elle même inférieure à celle de l’avion. On retrouve la hiérarchie de ces trois modes de transport en fonction de la valeur du temps.

**5.1.2 La proposition de Truong et Hensher (1985b)**

Rappelons que, pour Truong et Hensher (1985b), l’utilité marginale de la contrainte de temps est fonction du temps ( $t_i$ ) et du prix ( $p_i$ ) du déplacement et que sa fonction d’utilité indirecte est fondée sur une approximation linéaire à l’ordre 1 de l’utilité marginale du temps.

5.1.2.1 Proposition 1 (temps et coût) :

L'approche de Truong et Hensher (1985b) aboutit à une fonction d'utilité indirecte de la forme suivante :

$$V_i = a_i - \lambda p_i - \bar{k} t_i + (\beta t_i^2 + \gamma p_i t_i + \omega)$$

ce qui conduit à valeur du temps égale à 
$$VTTS_i = \frac{\partial V_i / \partial t_i}{\partial V_i / \partial p_i} \bigg|_{V = V_i} = \frac{-\bar{k} + \gamma p_i + 2\beta t_i}{-\lambda + \gamma}$$

La fonction d'utilité n'est plus linéaire. Elle intègre un effet croisé entre le prix et le temps, ainsi que le temps au carré. Les paramètres de la fonction d'utilité ne varient pas d'un mode de transport à l'autre. Nous ne pouvons pas calculer des valeurs du temps différentes entre modes de transport .

On trouvera les résultats d'estimation du modèle de Truong et Hensher dans le tableau 5.5 ci-dessous.

Tableau n° 5.5 : Estimation du modèle de Truong et Hensher

| Variables explicatives               | Coefficients | t de Student |
|--------------------------------------|--------------|--------------|
| Coût de transport (F)                | -0,00486     | -12,77       |
| Temps de transport (min)             | -0,01698     | -13,67       |
| Coût de transport*temps de transport | 0,000002     | 1,85         |
| Temps de transport au carré          | 0,000010     | 5,92         |
| Constante pour la voiture            | -2,70        | -6,93        |
| Constante pour le train              | -4,59        | -11,33       |
| Nombre d'observations                |              | 7607         |
| Log Vraisemblance à zéro             |              | -8357        |
| Log Vraisemblance de Béta            |              | -3651        |

Mise à part l'interaction entre temps et coût de transport, les coefficients sont tous significativement différents de zéro. Il est facile de faire un test du rapport de vraisemblance permettant de comparer ce modèle à celui de Becker (encadré n°3). L'hypothèse nulle est très largement rejetée. En revanche, il n'est pas possible de comparer directement ce modèle avec celui de De Serpa, aucun des deux modèles ne pouvant être obtenu en imposant des restrictions à l'autre.

Encadré n° 3 : test de rapport de vraisemblance

|                                                                                   |
|-----------------------------------------------------------------------------------|
| H0 : les coefficients $\beta$ et $\gamma$ sont nuls                               |
| Test du rapport de vraisemblance : $LR=2*(-3651+3731)=160 > \chi^2(2)= 5,99$      |
| Nous rejetons l'hypothèse H0, les coefficients $\beta$ et $\gamma$ sont non nuls. |



Le tableau 5.6 présente des évaluations de la valeur du temps en fonction de la durée et du coût du déplacement qui résultent de ces estimations. La valeur du temps est liée positivement au coût de transport : plus ce dernier est élevé, plus l'individu sera disposé à payer cher pour obtenir un gain de temps. Conformément à nos attentes en général, la valeur du temps est liée négativement au temps de trajet : plus ce dernier est long, moins l'individu est disposé à payer pour gagner du temps.

**Tableau n° 5.6 : Valeur du temps tous modes confondus en Fr/h**

| Prix en Fr | Temps   |          |          |          |          |          |
|------------|---------|----------|----------|----------|----------|----------|
|            | 1 heure | 2 heures | 3 heures | 4 heures | 5 heures | 6 heures |
| 100        | 199     | 184      | 168      | 153      | 138      | 122      |
| 200        | 204     | 188      | 172      | 156      | 141      | 125      |
| 300        | 210     | 193      | 177      | 160      | 144      | 127      |
| 400        | 216     | 199      | 181      | 164      | 147      | 130      |
| 500        | 222     | 204      | 186      | 168      | 150      | 132      |
| 600        | 229     | 211      | 192      | 173      | 154      | 136      |
| 700        | 237     | 217      | 198      | 178      | 159      | 139      |
| 800        | 245     | 225      | 204      | 184      | 163      | 143      |
| 900        | 254     | 233      | 211      | 190      | 168      | 147      |
| 1000       | 264     | 242      | 219      | 197      | 174      | 151      |

Nous proposons d'élargir ce résultat aux différents modes de transport. Pour cela, nous estimons un modèle logit conditionnel, avec des coefficients associés au coût et au temps de transport spécifiques à chaque mode. Ce modèle correspond en fait au relâchement d'une hypothèse implicite de Truong et Hensher (1985b). En effet, ce dernier introduit les effets du temps et du revenu en faisant une approximation du premier ordre des multiplicateurs de Lagrange associés à la contrainte liant temps et coût de transport. Ce faisant, il néglige deux points importants : tout d'abord que les autres multiplicateurs de Lagrange dépendent également des paramètres et devraient donc faire l'objet de la même approximation ; et d'autre part que, les modes de transport ayant des points moyens différents, l'approximation à réaliser dépend du mode de transport. En réintroduisant ces deux points, on retrouve un modèle conditionnel.

Les résultats d'estimation de ce modèle figurent dans le tableau n°5.7.

Tableau n° 5.7 : Relâchement des contraintes sur les variables coût et temps de transport

| Variables explicatives               | Voiture      |              | Train        |              | Avion        |              |
|--------------------------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
|                                      | Coefficients | t de Student | Coefficients | t de Student | Coefficients | t de Student |
| Coût de transport (F)                | -0,0202      | -12,17       | 0,00006      | 0,05         | -0,00518     | -4,23        |
| Temps de transport (min)             | 0,0050       | 1,40         | -0,0155      | -11,36       | -0,00063     | -0,05        |
| Coût de transport*temps de transport | -0,000052    | -5,85        | 0,000013     | 6,31         | -0,00014     | -2,16        |
| Temps de transport au carré          | 0,000045     | 9,51         | -0,000008    | -2,82        | 0,00002      | 3,22         |
| Constante                            | 1,43010      | 1,29         | -1,47359     | -1,32        |              |              |
| Nombre d'observations                | 7607         |              |              |              |              |              |
| Log Vraisemblance à zéro             | -8357        |              |              |              |              |              |
| Log Vraisemblance de Béta            | -3530        |              |              |              |              |              |

Le modèle obtenu n'est pas satisfaisant : beaucoup de paramètres ne sont pas significatifs ou n'ont pas les signes attendus. Il nous est donc impossible d'effectuer une évaluation de la valeur du temps dans ce cas précis.

5.1.2.2 Proposition 2 (Truong et Hensher sans effet coût)

On peut enfin, comme noté au chapitre 1, s'interroger sur les rôles respectifs du temps et du coût en comparant le modèle de Truong et Hensher (1985b) avec celui qu'on obtient en faisant l'hypothèse que l'utilité marginale du temps n'est fonction que de la durée de trajet, éliminant ainsi l'effet du coût. Nous obtenons alors la fonction d'utilité indirecte suivante :

$$V_i = a_i - \lambda p_i - \bar{k} t_i + \beta' t_i^2 + \omega'$$

qui diffère de la précédente par la suppression du terme croisant coût et temps dont on a vu plus haut qu'il n'avait pas d'effets estimé significativement différent de zéro.

La valeur du temps correspondante est égale à : 
$$VTTS_i = \frac{\partial V_i / \partial t_i}{\partial V_i / \partial p_i} \bigg|_{V = V_i} = \frac{-\bar{k} + 2\beta' t_i}{-\lambda}$$

Le tableau n°5.8 présente les résultats d'estimation d'un modèle logit conditionnel intégrant cette proposition.

Tableau n° 5.8 : modèle logit conditionnel avec la variable temps au carré

| Variables explicatives      | Voiture      |              | Train        |              | Avion        |              |
|-----------------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
|                             | Coefficients | t de Student | Coefficients | t de Student | Coefficients | t de Student |
| Coût de transport           | -0,0059      | -11,05       | -0,00284     | -5,61        | -0,00295     | -4,77        |
| Temps de transport          | -0,0248      | -12,82       | -0,0159      | -11,89       | -0,02326     | -2,25        |
| Temps de transport au carré | 0,000032     | 11,89        | 0,000010     | 5,35         | 0,000035     | 1,28         |
| constante                   | 3,454602     | 4,09         | 0,152853     | 0,18         |              |              |
| Nombre d'observations       | 7607         |              |              |              |              |              |
| Log Vraisemblance à zéro    | -8357        |              |              |              |              |              |
| Log Vraisemblance de Béta   | -3592        |              |              |              |              |              |

Les résultats du modèle sont très satisfaisants, tant du point de vue statistique qu'économique. Sur le plan statistique, les paramètres estimés sont tous significatifs. Sous l'angle économique, ils ont les signes attendus. Le prix et le temps de transport ont un effet négatif sur les probabilités de choix modal. Le coefficient de la variable temps au carré est positif, ce qui est cohérent avec la fonction d'utilité indirecte. Plus le trajet est long, moins une variation de temps a une incidence sur le choix du mode de transport. Ce résultat est à mettre en parallèle avec la forme de la fonction d'utilité que nous avons obtenue dans le chapitre 4. De plus, selon le mode de transport, les sensibilités au gain de temps varient énormément.

La décroissance de la valeur du temps par rapport à la durée du déplacement est beaucoup plus forte pour l'avion, comparativement à la voiture et au train (cf. tableau n°5.9).

Tableau n° 5.9 : Evaluation de la valeur du temps en fonction de la durée du trajet et selon le mode de transport.

|                      | Voiture | Train |             | Avion |
|----------------------|---------|-------|-------------|-------|
| Durée du déplacement |         |       |             |       |
| 1 heure              | 213     | 259   | 1 heure     | 387   |
| 2 heures             | 173     | 238   | 1 heure 30  | 344   |
| 3 heures             | 134     | 217   | 2 heures    | 302   |
| 4 heures             | 95      | 196   | 2 heures 30 | 259   |
| 5 heures             | 56      | 175   | 3 heures    | 216   |
| 6 heures             | 17      | 154   | 3 heures 30 | 173   |
| VOT au point moyen   | 152     | 201   |             | 245   |
| temps moyen          | 180     | 195   |             | 137   |

Nous venons de montrer qu'il était légitime de considérer une non constance de l'utilité marginale, et qu'elle pouvait être fonction du prix du déplacement et/ou de la durée du trajet.

Seule la deuxième proposition semble retenir notre attention, car elle reste toujours pertinente lorsqu'on l'utilise dans une analyse spécifique à chaque mode.

### 5.1.3 Modèle de Jara-Diaz et Videla (1989)

Ce modèle vise essentiellement à tester l'existence d'un lien entre le revenu et la valeur du temps. Jara-Diaz et Videla (1989) proposent la fonction d'utilité suivante :

$$V_i = \alpha_0 + \alpha_c c_i + \frac{1}{2} \alpha_c^2 c_i^2 + V_2(Q_i)$$

où les coefficients dépendent de la tranche de revenu,  $c$ .

On en déduit, pour la tranche de revenu  $c$ , la valeur du temps suivante :

$$VT_i = \frac{\partial V_i / \partial t_i}{\partial V_i / \partial c_i} = \frac{\alpha_t}{\alpha_c + \alpha_c^2 c_i}$$

Nous estimons cette fonction d'utilité pour quatre tranches de revenus. Pour plus de lisibilité, nous ne prenons pas en compte le mode de transport dans cette analyse. Les résultats d'estimation sont présentés dans le tableau 5.10.

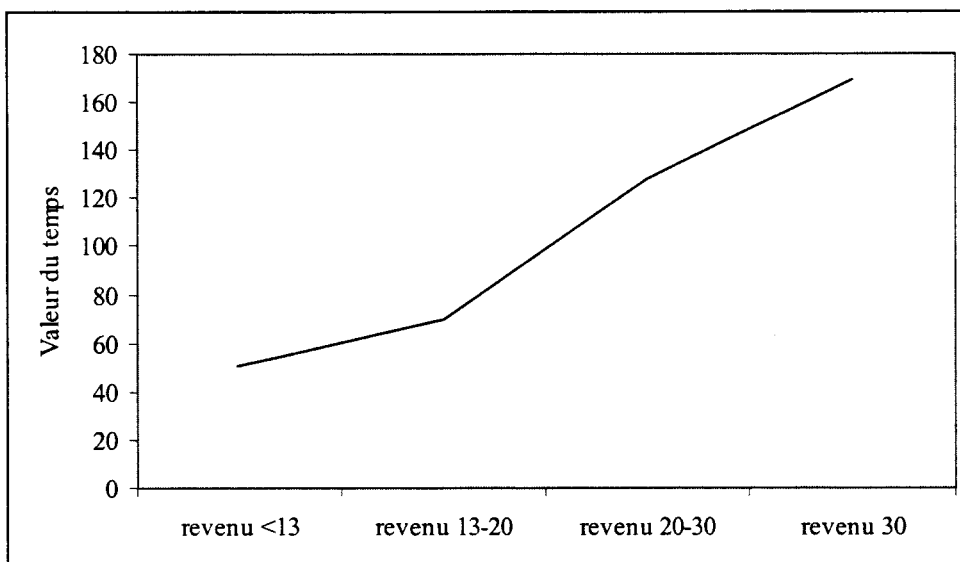
**Tableau n° 5.10 : estimation du modèle de Jara-Diaz et Videla selon les tranches de revenus**

|                                    | Revenu <13          | Revenu 13-20        | Revenu 20-30        | Revenu 30           |
|------------------------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| Coût de transport                  | -0,0072<br>(-13,40) | -0,0086<br>(-12,09) | -0,0068<br>(-11,13) | -0,0040<br>(-5,90)  |
| Coût de transport au carré         | 0,000002<br>(7,21)  | 0,000002<br>(6,32)  | 0,000001<br>(6,50)  | 0,000000<br>(1,13)  |
| Temps de transport                 | -0,0051<br>(-6,62)  | -0,0083<br>(-7,39)  | -0,0115<br>(-11,79) | -0,0105<br>(-10,35) |
| Constante de l'alternative voiture | -1,9386<br>(-3,36)  | -2,0623<br>(-2,76)  | -0,3832<br>(-0,63)  | -1,5246<br>(-2,39)  |
| Constante de l'alternative train   | -3,5461<br>(-5,89)  | -4,6901<br>(-5,95)  | -2,4672<br>(-3,82)  | -3,3390<br>(-4,89)  |
| Nombre d'observations              | 2134                | 2023                | 1770                | 1331                |
| Log Vraisemblance à zéro           | -2344               | -2222               | -1945               | -1462               |
| Log Vraisemblance de Béta          | -1132               | -711                | -825                | -734                |
| Coût moyen                         | 402                 | 408                 | 480                 | 547                 |
| Valeur du temps                    | 51                  | 70                  | 128                 | 169                 |

Selon Jara-Diaz et Videla (1989), s'il y a un effet revenu, celui-ci se traduit par un effet significatif de la variable coût de transport au carré, et ceci pour toutes les tranches. Ce qui est effectivement le cas. La valeur du temps que nous avons calculée pour chaque tranche l'a été pour une valeur moyenne du coût de transport. Elle varie entre 51 Fr./h pour les revenus les plus bas, et 169 Fr./h pour les revenus les plus élevés.

Graphiquement, on observe une relation approximativement linéaire de pente positive de la valeur en fonction du revenu (cf. graphique n°5.1). Waters (1994) montre que la valeur du temps est relié avec la racine carré du revenu. Dans notre cas, cette relation est plutôt de type linéaire.

Il existerait bien, pour les déplacements de voyageurs sur longue distance, un lien entre valeur du temps et revenu. Néanmoins, Jara-Diaz et Videla (1989) ne propose pas une formulation de la valeur du temps qui intègre explicitement le revenu. C'est pourquoi nous allons étudier la proposition de Causse (1999).

**Graphique n° 5.1 : évolution de la valeur du temps en fonction du revenu**

### 5.1.4 La proposition de Causse (1999)

L'adaptation à notre étude de la forme polynomiale suggérée par Causse (1999), exposée dans le chapitre 2, débouche sur une fonction d'utilité indirecte du type :

$$V_i = cste - \tilde{\alpha} p_i + \frac{1}{2} \beta (p_i^2 - 2R p_i) + \gamma (R t_i - p_i t_i) + \tilde{\delta} t_i - \frac{\xi}{2} t_i^2$$

et la valeur du temps qui en découle s'exprime de la manière suivante :

$$VTS_i = \frac{\partial V_i / \partial \bar{t}_i}{\partial V_i / \partial p_i} = \frac{\tilde{\delta} - \xi \bar{t}_i - \gamma p_i + \gamma R}{-\tilde{\alpha} + \beta p_i - \gamma \bar{t}_i - \beta R}$$

Les paramètres  $\tilde{\alpha}$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ ,  $\tilde{\delta}$  et  $\xi$  ne variant pas d'un mode de transport à l'autre, nous allons utiliser le modèle logit simple. Si nous respectons les contraintes sur les paramètres, nous ne pouvons donc pas calculer des valeurs du temps spécifiques à chaque mode.

Les résultats d'estimation du modèle de Causse sont présentés dans le tableau n°5.11. L'interaction coût-revenu correspond au terme  $p_i^2 - 2R p_i$ , l'interaction temps-revenu au terme  $R t_i - p_i t_i$ .

Ces résultats ne sont pas satisfaisants. En particulier, nous constatons qu’il y a des problèmes de signe. En effet, dans la fonction d’utilité proposée par Causse, la variable du temps de transport doit avoir un effet positif sur l’utilité du mode de transport. Inversement, la variable du temps de transport au carré devrait agir négativement sur cette même utilité. Or, nous obtenons les signes inverses. De plus, le paramètre associé à la variable d’interaction entre coût et revenu n’est pas significatif. On devrait donc s’attendre à une indépendance entre le prix du transport et la valeur du temps. Ce résultat contredit la proposition de Truong et Hensher (1985b).

**Tableau n° 5.11 : Estimation du modèle de Causse.**

| Variables explicatives      | Coefficients | t de Student |
|-----------------------------|--------------|--------------|
| Coût de transport (F)       | -0,0044      | -19,34       |
| Temps de transport (min)    | -0,0148      | -11,03       |
| Temps de transport au carré | 1,06E-05     | 6,26         |
| Interaction coût-revenu     | -2,30E-10    | -1,04        |
| Interaction temps-revenu    | -7,88E-09    | -3,00        |
| Constante pour la voiture   | -2,14        | -7,42        |
| Constante pour le train     | -4,02        | -13,12       |
| Nombre d'observations       |              | 7607         |
| Log Vraisemblance à zéro    |              | -8357        |
| Log Vraisemblance de Béta   |              | -3697        |

On trouvera au tableau 5.12 les résultats du calcul de la valeur du temps en fonction du coût de transport, de la durée du trajet et du revenu de l’individu. Afin de mesurer l’ampleur de l’effet de chacune des variables sur la valeur du temps, nous avons calculé ces effets toutes choses égales par ailleurs, c’est à dire en maintenant constantes<sup>24</sup> les valeurs des autres variables. Ainsi, nous pouvons analyser facilement la cohérence des résultats obtenus (cf. tableau 5.12).

<sup>24</sup> Elles sont fixées à leur valeur moyenne.

Tableau n° 5.12 : évaluation de la valeur du temps proposée par Causse

| Coût du transport | Valeur du temps<br>Temps= 3 heures 20<br>Revenu = 180 000 fr | temps de transport | Valeur du temps<br>Coût = 350 fr<br>Revenu = 180000 fr | revenu  | Valeur du temps<br>Temps= 3 heures 20<br>Coût = 350 fr |
|-------------------|--------------------------------------------------------------|--------------------|--------------------------------------------------------|---------|--------------------------------------------------------|
| 100               | 136                                                          | 60                 | 174                                                    | 40 000  | 120                                                    |
| 200               | 136                                                          | 120                | 158                                                    | 80 000  | 125                                                    |
| 300               | 136                                                          | 180                | 142                                                    | 120 000 | 129                                                    |
| 400               | 136                                                          | 240                | 125                                                    | 160 000 | 134                                                    |
| 500               | 136                                                          | 300                | 109                                                    | 200 000 | 138                                                    |
| 600               | 136                                                          | 360                | 92                                                     | 240 000 | 143                                                    |
| 700               | 136                                                          | 420                | 76                                                     | 280 000 | 148                                                    |
| 800               | 136                                                          | 480                | 60                                                     | 320 000 | 153                                                    |
| 900               | 136                                                          | 540                | 43                                                     | 360 000 | 158                                                    |
| 1 000             | 136                                                          | 600                | 27                                                     | 400 000 | 163                                                    |

Nous constatons que le coût du déplacement n’a pas d’effet sur la valeur du temps, ce qui est la conséquence des valeurs très faibles des interactions temps-revenu et coût-revenu. Les effets de la durée de trajet et du revenu sur cette valeur sont cohérents sur le plan économique. Les personnes ayant un revenu élevé sont prêtes à payer plus cher pour gagner du temps. Pour ce qui est de l’effet de la durée de déplacement, nous retrouvons le résultat observé plus haut, les individus étant prêts à payer plus cher pour obtenir un gain de temps sur les déplacements les plus courts.

Comment ces résultats évoluent-ils si l’on distingue les différents modes de transport ? Pour répondre à la question, nous estimons à nouveau le modèle, mais en laissant les paramètres associés aux variables coût du déplacement, temps de transport et temps de transport au carré varier d’un mode à l’autre. On trouvera tableau 5.13 les résultats de ces estimations.

Tableau n° 5.13 : Modèle de Causse généralisé aux différents modes de transport

| Variables explicatives      | Voiture      |              | Train        |              | Avion        |              |
|-----------------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
|                             | Coefficients | t de Student | Coefficients | t de Student | Coefficients | t de Student |
| Coût de transport (F)       | -0,006       | -10,76       | -0,003       | -5,49        | -0,003       | -4,73        |
| Temps de transport (min)    | -0,023       | -11,63       | -0,014       | -9,80        | -0,022       | -2,14        |
| Temps de transport au carré | 3,2E-05      | 11,92        | 1,0E-05      | 5,46         | 3,8E-05      | 1,36         |
| Interaction coût-revenu     | -3,7E-10     | -0,88        | -3,7E-10     | -0,88        | -3,7E-10     | -0,88        |
| Interaction temps-revenu    | -7,6E-09     | -2,93        | -7,6E-09     | -2,93        | -7,6E-09     | -2,93        |
| Constante                   | 3,47         | 4,07         | 0,15         | 0,18         |              |              |
| Nombre d'observations       | 7607         |              |              |              |              |              |
| Log Vraisemblance à zéro    | -8357        |              |              |              |              |              |
| Log Vraisemblance de Béta   | -3577        |              |              |              |              |              |

Le test de rapport de vraisemblance montre que les coefficients de ces variables sont bien significativement différents les uns des autres (encadré n° 4).



#### Encadré n° 4 : test de rapport de vraisemblance

$H_0$  : les  $\tilde{\alpha}_i$ ,  $\beta_i$ , et  $\xi_i$  sont tous égaux

Test du rapport de vraisemblance :  $LR=2*(-3577+3697) = 240 > \chi^2(6)= 12,59$

Nous rejetons l'hypothèse  $H_0$ , les paramètres sont tous significativement différents les uns des autres.

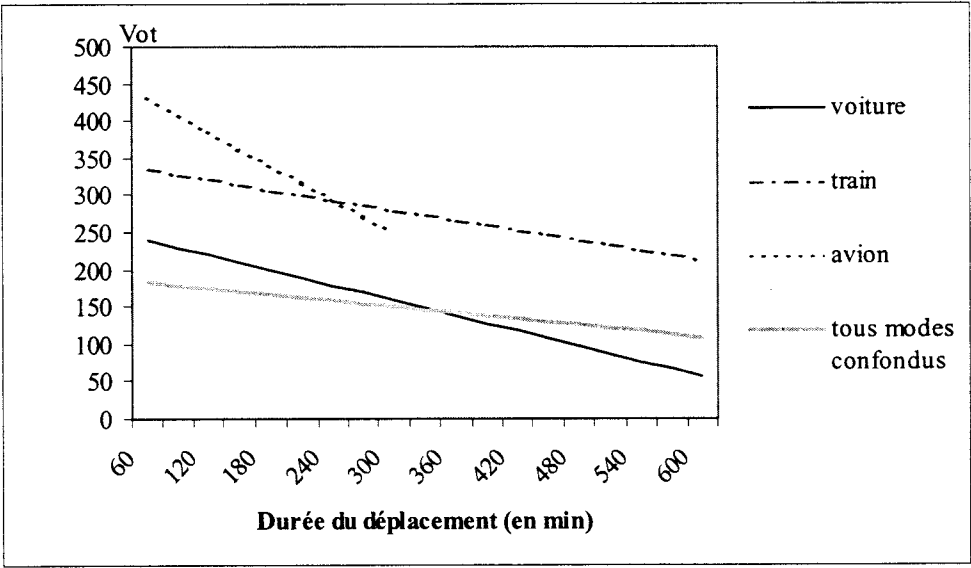
La variable d'interaction entre coût et revenu est toujours non significative. Pour ce qui est des autres variables du modèle, elles sont toutes significatives et conservent les mêmes signes.

Nous avons réalisé des graphiques (cf. graphiques 5.2 à 5.4) pour présenter de manière synthétique l'incidence de l'effet des variables durée du trajet, revenu et coût sur la valeur du temps.

Du graphique n°5.2 représentant l'effet de la durée de déplacement, il ressort que :

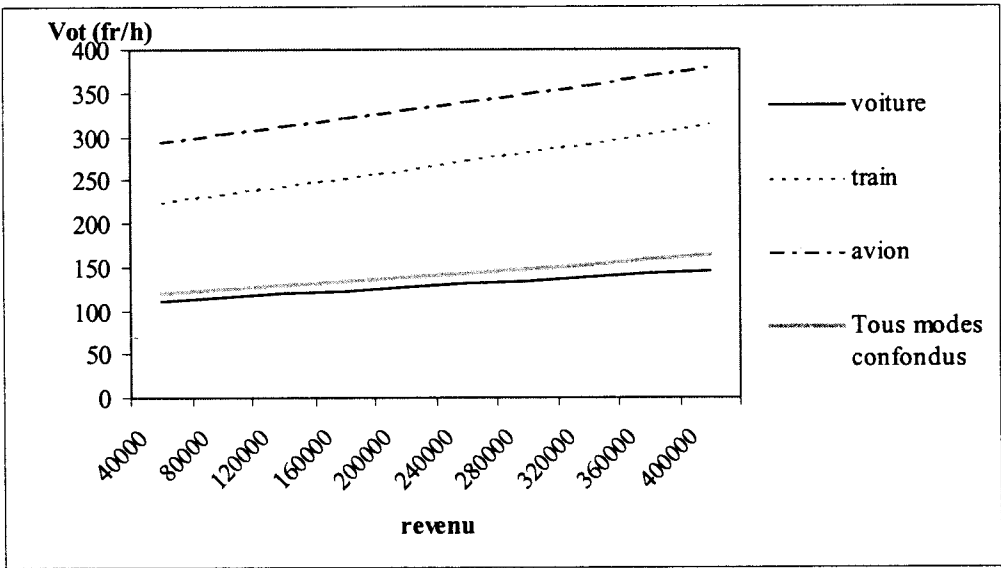
1. D'une part, la hiérarchie entre les modes de transports est respectée, la valeur du temps de l'avion étant plus élevée que celle du train, elle-même plus élevée que celle de la voiture.
2. D'autre part, l'effet de la durée du trajet sur la valeur du temps n'est pas le même d'un mode à l'autre. La distinction entre modes de transport dans le calcul de la valeur du temps montre donc qu'il existe des comportements très hétérogènes sur la perception de la durée du trajet, selon qu'on utilise l'avion, le train ou la voiture pour se déplacer.

Graphique n° 5.2 : Evolution de la valeur du temps en fonction de la durée de déplacement

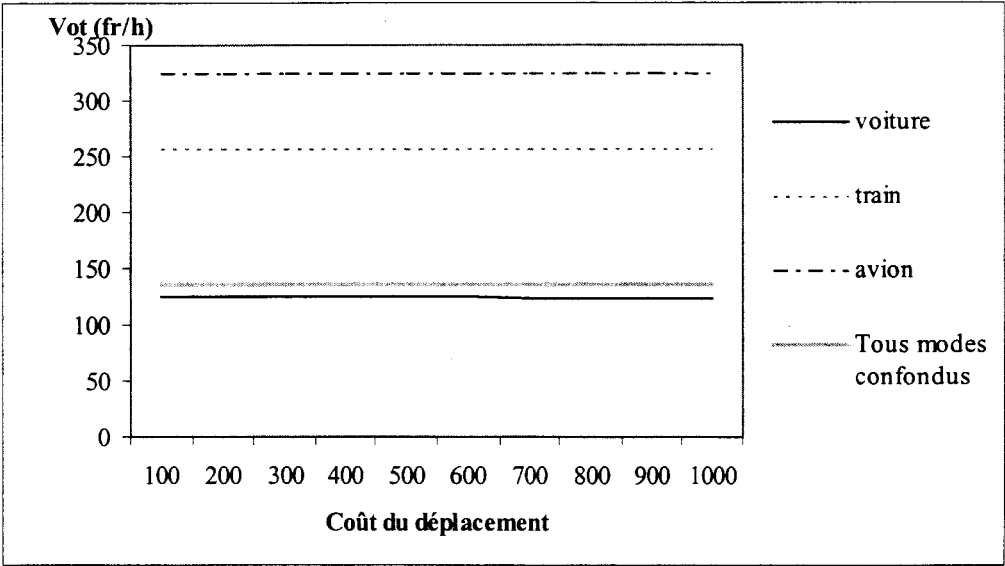


Quand on analyse dans le détail l'effet du revenu sur la valeur du temps (graphique n°5.3), nous retrouvons sans surprise la hiérarchie usuelle entre les trois modes de transport. Les valeurs du temps croissent, de manière approximativement parallèle, avec le niveau du revenu. En conséquence, les différences entre valeurs correspondant à chacun des modes de transport, sont approximativement stables quand on progresse dans la hiérarchie des revenus.

Graphique n°5.3 : Evolution de la valeur du temps en fonction du revenu



Graphique n° 5.4 : Evolution de la valeur du temps en fonction du coût du déplacement



Le graphique 5.4 montre très clairement l’absence d’effet du prix du déplacement sur la valeur du temps. Nous pouvons supposer que l’introduction du revenu dans le calcul de la valeur du temps capte l’ensemble de l’effet de la variable prix.

Cette partie a pu mettre en évidence l’existence d’un lien entre la durée du trajet, le revenu et la valeur du temps. Nous montrons qu’il y a une suprématie des formes non-linéaire sur les formes linéaires des fonctions d’utilité indirectes. La proposition de Causse (1999) est très intéressante, car elle propose une forme fonctionnelle qui intègre de manière précise le revenu et le temps ainsi que le coût dans le calcul de la valeur. Mais elle souffre d’un problème de validation statistique, avec en particulier des erreurs de signes sur les variables associées au temps de transport.

S’il n’y a aucun doute quant à la nécessité d’introduire le temps de transport au carré dans la fonction d’utilité indirecte, qui a été validée à la fois à partir des modèles de Truong et Hensher (1985b) et de Causse (1999), nous ne sommes pas encore parvenus à un mode d’introduction satisfaisant de l’effet du revenu.

### 5.1.5 Vers une intégration plus explicite du revenu dans la fonction de la valeur du temps

Les estimations précédentes montrent qu'il est nécessaire d'introduire la variable revenu dans la fonction de la valeur du temps. C'est pourquoi nous proposons de croiser le temps et le revenu de telle sorte que l'on puisse utiliser ce dernier lorsque l'on dérive la fonction d'utilité indirecte. La proposition de Truong et Hensher (1985b) se prête bien à la réalisation de ce croisement. En effet, dans le modèle initial de Bates et Roberts (1986), le revenu est un paramètre de la contrainte de budget. En conséquence, la valeur à l'optimum des multiplicateurs de Lagrange en dépend.

Comme nous disposons d'une variable de revenu par tranche, dont les essais antérieurs ont montré qu'elle était nettement préférable à une variable en niveau<sup>25</sup>, l'introduction du revenu comme paramètre conduit à une fonction d'utilité indirecte de la forme suivante :

$$V_i = cste - \alpha_i p_i - \sum_{k=1}^K \varphi_{i,k} R_k t_i + \xi_k R_k t_i^2$$

où  $R_k = 1$  si l'individu appartient à la tranche de revenu  $k$ , 0 sinon.

La valeur du temps qui découle de la fonction d'utilité indirecte s'exprime de la manière suivante :

$$VTTS_i = \frac{\partial V_i / \partial t_i}{\partial V_i / \partial p_i} = \frac{-\sum_{k=1}^K \varphi_{i,k} R_k + 2\xi_k R_k t_i}{-\alpha_i}$$

Nous pouvons ainsi déterminer la valeur du temps d'un individu ayant un revenu appartenant à la tranche  $k$ , et effectuant un déplacement d'une durée de  $t$  avec le mode  $i$  :

$$VTTS_{i,k} = \frac{\partial V_i / \partial t_i}{\partial V_i / \partial p_i} = \frac{-\varphi_{i,k} + 2\xi_k t}{-\alpha_i}$$

<sup>25</sup> Rappelons que, dans l'enquête, la variable en niveau est souvent mal renseignée, contrairement au découpage en tranches de revenus.

Cette fonction de valeur du temps intègre les hypothèses faites précédemment, c’est-à-dire qu’elle tient compte du lien entre la valeur du temps et le revenu, et de la durée du trajet. Elle est proche de la proposition 2 faite dans la section 5.1.2.2. En effet, s’il n’y a pas d’effet revenu, alors, nous aurions la fonction d’utilité associée à la proposition 2.

On trouvera au tableau n°5.14 les résultats d’estimations de ce modèle. Dans cette estimation, nous avons contraint les paramètres du temps de transport au carré à être tous égaux. Un premier essai a en effet montré que l’utilisation d’effets différents entre tranches de revenus sur cette variable aboutissait à des estimations économétriques non cohérentes.

**Tableau n° 5.14 : Estimation d’un modèle intégrant le temps au carré et un effet croisé entre le temps de transport et les tranches de revenu.**

|                             | Voiture      |              | Train        |              | Avion        |              |
|-----------------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
|                             | Coefficients | t de Student | Coefficients | T de Student | Coefficients | t de Student |
| Coût de transport           | -0,0080      | -16,95       | -0,0020      | -4,05        | -0,0031      | -5,41        |
| Temps*revenu <13            | -0,0089      | -6,80        | -0,0065      | -5,53        | -0,0156      | -5,33        |
| Temps*revenu 13-20          | -0,0104      | -7,30        | -0,0117      | -8,74        | -0,0218      | -6,62        |
| Temps*revenu >20            | -0,0120      | -9,91        | -0,0123      | -11,03       | -0,0215      | -7,82        |
| Temps de transport au carré | 1,53E-05     | 7,60         | 1,42E-06     | 1,01         | 2,51E-05     | 3,20         |
| Constante                   | 2,1231       | 4,10         | -0,6936      | -1,34        |              |              |
| Nombre d'observations       |              |              |              |              |              |              |
|                             |              |              |              | 7607         |              |              |
| Log Vraisemblance à zéro    |              |              |              | -8357        |              |              |
| Log Vraisemblance de Béta   |              |              |              | -3567        |              |              |

Nous constatons que l’utilisation d’un effet croisé entre le revenu et le temps accroît le pouvoir explicatif du modèle. Conformément à ce qui a été signalé plus haut, tester l’existence d’un effet revenu, revient à faire le test de rapport de vraisemblance sur les  $\varphi_{i,k}$  (encadré n°5). Ce test conduit au rejet de l’hypothèse nulle, les paramètres sont significativement différents les uns des autres.

**Encadré n° 5 : Test du rapport de vraisemblance**

|                                                                                             |
|---------------------------------------------------------------------------------------------|
| H0 : $\varphi_{i,1} = \dots = \varphi_{i,K}$                                                |
| LR = $2*(-3567+3592)=50 > \chi^2(6) = 12,59$                                                |
| Les coefficients $\varphi_{i,k}$ sont tous significativement différents les uns des autres. |

De plus, ce modèle offre une bonne lisibilité de l’effet des variables tranche de revenu et temps de transport. A titre d’exemple, nous allons analyser la fonction d’utilité associée à la

voiture : plus le revenu de l'individu augmente, plus il sera sensible au temps de transport (le coefficient de la variable temps passe de -0,0089 pour la tranche de revenus la plus faible à - 0,012 pour la tranche de revenu la plus élevée).

Nous présentons dans le tableau n°5.15 des valeurs du temps selon le mode, la durée du trajet et les tranches de revenu. La valeur du temps du mode fer paraît très élevée et décroît moins vite avec la durée du trajet que celles de la voiture et de l'avion. De plus, quand on passe de la tranche de revenus la plus faible à la plus élevée, ces valeurs doublent, alors que cette croissance est nettement plus faible pour la voiture ou l'avion. On remarquera enfin des valeurs du temps voiture très faibles, voire négatives, pour les temps de parcours élevés.

Tableau n° 5.15 : Evaluation de la valeur du temps selon le mode, le temps et le revenu

|                | 1 heure | 2 heures   | 3 heures | 4 heures    | 5 heures | 6 heures    |
|----------------|---------|------------|----------|-------------|----------|-------------|
| <i>Voiture</i> |         |            |          |             |          |             |
| Revenu <13     | 53      | 39         | 26       | 12          | -2       | -16         |
| Revenu 13-20   | 65      | 51         | 37       | 23          | 9        | -5          |
| Revenu >20     | 77      | 63         | 49       | 35          | 22       | 8           |
| <i>Train</i>   |         |            |          |             |          |             |
| Revenu <13     | 187     | 182        | 177      | 172         | 167      | 162         |
| Revenu 13-20   | 339     | 334        | 329      | 324         | 319      | 314         |
| Revenu >20     | 356     | 351        | 346      | 341         | 336      | 331         |
|                | 1 heure | 1 heure 30 | 2 heures | 2 heures 30 | 3 heures | 3 heures 30 |
| <i>Avion</i>   |         |            |          |             |          |             |
| Revenu <13     | 243     | 214        | 185      | 156         | 127      | 98          |
| Revenu 13-20   | 361     | 332        | 303      | 274         | 245      | 216         |
| Revenu >20     | 355     | 326        | 297      | 268         | 239      | 210         |

En conclusion, nous allons comparer les valeurs du temps des différents modèles. Les valeurs qui dépendent du temps, du coût ou du revenu ont été calculées pour des niveaux moyens de ces variables. Les résultats figurent dans le tableau n°5.16.

**Tableau n° 5.16 : comparaison des valeurs du temps (F/heure) selon les modèles étudiés**

| Auteurs                                         | Voiture | Train | Avion |
|-------------------------------------------------|---------|-------|-------|
| Becker                                          | 131     | 131   | 131   |
| De Serpa                                        | 280     | 199   | 202   |
| De Serpa (effets spécifiques par modes)         | 61      | 228   | 357   |
| Truong et Hensher                               | 181     | 181   | 181   |
| Modèle avec effet « durée de trajet »           | 152     | 201   | 245   |
| Causse                                          | 136     | 136   | 136   |
| Causse (effets spécifiques par modes)           | 124     | 258   | 236   |
| Modèle avec effet « revenu et durée de trajet » | 37      | 277   | 278   |

Le lien étroit entre le calcul de la valeur du temps et la fonction d'utilité indirecte, c'est-à-dire le cadre microéconomique dont elle découle, est nettement mis en évidence. En conséquence, il existe autant de valeurs du temps que de spécifications différentes. La variabilité est très forte. Ainsi, la valeur estimée va de 37 Fr/h pour le modèle à effet de revenu avec durée du trajet, à 280 fr/h pour le modèle de De Serpa. Ces amplitudes sont toutes aussi fortes pour les autres modes de transport. Les résultats sont rarement cohérents avec les évaluations antérieures, par exemple celles qui figurent dans le rapport Boiteux (voir tableau 5.1).

## 5.2 Valeur du temps et choix modal

La première section nous a permis de confronter différentes propositions sur la base d'une méthodologie homogène. Il en ressort une préférence pour des modèles ayant la double propriété de fournir des évaluations de la valeur du temps qui dépendent de la durée du déplacement, et d'incorporer un effet du revenu. De ce point de vue, le modèle qui a nos préférences est celui qui combine effet de revenu et durée du trajet. Le modèle de Causse est également intéressant de ce point de vue. Il présente cependant une difficulté : les signes des coefficients estimés pour certaines variables ne sont pas conformes aux prédictions théoriques de Causse (1999).

Il reste que ces deux modèles n'ont pas encore été estimés pour un ensemble complet de déterminants du choix modal. C'est ce que nous allons faire dans cette section pour le

modèle avec effet de revenu et durée du trajet. On trouvera en annexe les résultats de l'estimation complète du modèle de Causse. Nous confronterons ensuite les valeurs du temps, calculées sur la base de l'estimation de ces deux modèles, entre elles et avec les valeurs qu'on obtient sur la base des estimations du chapitre 4. Celles-ci correspondent, respectivement, au modèle de De Serpa avec effets spécifiques à chaque mode et au modèle avec effet de la durée du trajet, mais sans effet du revenu.

### **5.2.1 Estimation du modèle complet avec une spécification logit emboîté**

Le tableau 5.17 présente les résultats d'estimation de ce modèle, la spécification étant celle d'un logit emboîté.

La prise en compte d'un effet croisé entre le revenu et le temps de transport dans la modélisation du choix modal ne dégrade pas la qualité de prévision du modèle. De plus, nous retrouvons les différents résultats observés dans le chapitre 4 : la probabilité de choisir la voiture et/ou le train croît avec l'âge. Il n'y a pas de différences significatives entre sexes. Les cadres supérieurs choisissent plutôt l'avion. Ce mode de transport reste sous-utilisé par les ouvriers au profit de la voiture et du train. On retrouve cette même tendance, mais moins marquée, pour les professions intermédiaires. Le nombre de véhicules dans le ménage, ainsi que la distance annuelle parcourue en voiture influencent positivement la probabilité de choisir la voiture, plutôt au détriment du train. Les voyages à une ou deux personnes se font moins fréquemment en voiture mais plus souvent en train. Les déplacements professionnels et les voyages de courte durée ont un effet positif sur la probabilité de choisir l'avion.



Tableau n° 5.17 : estimation du modèle complet

|                                                 | Voiture      |              | Train        |              | Avion        |              |
|-------------------------------------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
|                                                 | Coefficients | t de Student | Coefficients | t de Student | Coefficients | t de Student |
| <b>Caractéristiques de l'offre de transport</b> |              |              |              |              |              |              |
| Coût de transport                               | -0,008       | -18,06       | -0,004       | -6,95        | -0,002       | -7,25        |
| Temps*revenu <13                                | -0,006       | -5,33        | -0,006       | -6,00        | -0,012       | -6,22        |
| Temps*revenu 13-20                              | -0,010       | -8,32        | -0,010       | -10,54       | -0,021       | -10,00       |
| Temps*revenu >20                                | -0,012       | -11,42       | -0,011       | -12,58       | -0,022       | -11,71       |
| Temps de transport au carré                     | 1,1E-05      | 5,89         | 4,3E-07      | 0,35         | 3,6E-05      | 7,16         |
| <b>Caractéristiques de l'individu</b>           |              |              |              |              |              |              |
| Age                                             | 0,020        | 7,66         | 0,021        | 7,95         |              |              |
| Homme                                           | -0,006       | -0,06        | 0,084        | 1,00         |              |              |
| PCS (Réf. Employé, agriculture)                 |              |              |              |              |              |              |
| Cadre supérieur                                 | -0,040       | -0,37        | -0,372       | -3,63        |              |              |
| Profession intermédiaire                        | 0,357        | 3,26         | 0,234        | 2,18         |              |              |
| Ouvrier                                         | 1,307        | 6,56         | 0,477        | 2,38         |              |              |
| Nombre de voitures                              | 0,106        | 1,85         | -0,320       | -5,66        |              |              |
| Distance parcourue en voiture                   | 8,0E-06      | 2,63         | -3,7E-05     | -11,07       |              |              |
| <b>Caractéristiques du déplacement</b>          |              |              |              |              |              |              |
| Taille du groupe (réf. + de deux pers)          |              |              |              |              |              |              |
| Une personne                                    | -1,718       | -13,28       | 0,731        | 5,20         |              |              |
| Deux personnes                                  | -0,978       | -7,73        | 0,589        | 4,17         |              |              |
| Motif du déplacement (réf. Visite)              |              |              |              |              |              |              |
| Professionnel                                   | -1,310       | -10,94       | -0,831       | -7,40        |              |              |
| Vacances                                        | 0,966        | 7,90         | -0,068       | -0,59        |              |              |
| Loisirs                                         | 0,548        | 3,72         | -0,179       | -1,24        |              |              |
| Durée du séjour (réf. Plus de trois jours)      |              |              |              |              |              |              |
| une journée                                     | -0,354       | -2,39        | -0,883       | -5,91        |              |              |
| deux jours                                      | -0,252       | -1,98        | -0,648       | -5,09        |              |              |
| trois jours                                     | -0,500       | -4,27        | -0,565       | -5,04        |              |              |
| Constante                                       | 2,842        | 8,11         | 0,268        | 0,76         |              |              |
| Valeur inclusive                                | 1,779        | 10,19        |              |              |              |              |
| Valeur du temps au point moyen (Fr/h)           | 40           |              | 147          |              | 246          |              |
| Nombre d'observations                           |              |              | 7607         |              |              |              |
| Log Vraisemblance à zéro                        |              |              | -8357        |              |              |              |
| Log Vraisemblance de Béta                       |              |              | -3708        |              |              |              |

Le tableau 5.18 présente l'évaluation de la valeur du temps pour le modèle complet selon le mode, le revenu et la durée de trajet.

Conformément aux attentes, celle-ci augmente avec le revenu et diminue avec la durée de trajet. En clair, plus le revenu est élevé, moins la durée de trajet est longue, plus la valeur du temps sera élevée. En ce qui concerne le mode voiture, pour des revenus très faibles et une durée de trajet très élevée, nous obtenons des valeurs négatives. On peut supposer que les ménages disposant d'un revenu modeste n'accordent pas d'importance à un gain de temps

sur un long déplacement. Enfin, pour l’avion, nous retrouvons les mêmes résultats que ceux obtenus avec la voiture. Paradoxalement, pour le train, la valeur du temps varie positivement avec le revenu mais reste relativement stable en fonction de la durée de trajet. On peut se demander dans quelle mesure ce résultat tient au fait que le temps passé dans le train peut être consacré à d’autres activités (et cela plus que dans les autres modes de transport), ce qui réduirait la sensibilité des valeurs du temps à la durée du trajet.

**Tableau n° 5.18 : Valeur du temps du modèle complet selon le mode de transport, la durée du trajet et le revenu.**

|                | 1 heure | 2 heures   | 3 heures | 4 heures    | 5 heures | 6 heures    |
|----------------|---------|------------|----------|-------------|----------|-------------|
| <i>Voiture</i> |         |            |          |             |          |             |
| Revenu <13     | 36      | 26         | 16       | 6           | -4       | -14         |
| Revenu 13-20   | 62      | 52         | 42       | 32          | 22       | 12          |
| Revenu >20     | 81      | 71         | 61       | 51          | 41       | 31          |
| <i>Train</i>   |         |            |          |             |          |             |
| Revenu <13     | 96      | 95         | 95       | 94          | 93       | 92          |
| Revenu 13-20   | 174     | 173        | 172      | 171         | 170      | 169         |
| Revenu >20     | 185     | 185        | 184      | 183         | 182      | 181         |
|                | 1 heure | 1 heure 30 | 2 heures | 2 heures 30 | 3 heures | 3 heures 30 |
| <i>Avion</i>   |         |            |          |             |          |             |
| Revenu <13     | 204     | 148        | 92       | 36          | -19      | -75         |
| Revenu 13-20   | 427     | 371        | 316      | 260         | 204      | 148         |
| Revenu >20     | 466     | 411        | 355      | 299         | 244      | 188         |

5.2.2 La comparaison entre modèles

Nous allons maintenant comparer les résultats des différents modèles. Comme signalé plus haut, aux évaluations issues du modèle avec effet revenu et durée du trajet (que nous venons d’estimer) et du modèle de Causse qui figure en annexe, nous ajoutons les évaluations correspondant aux estimations du chapitre 5. Elles correspondent respectivement au modèle de De Serpa et au modèle avec effet durée de trajet sans effet du revenu.

Les valeurs du temps calculées au point moyen, selon les différents modèles, sont présentées dans le tableau n°5.19. La prise en compte du choix modal dans l’évaluation des valeurs du temps affine considérablement l’estimation de celles-ci. En effet, la comparaison des

tableaux 5.16 et 5.19 montre que les valeurs de ce dernier sont beaucoup plus réalistes. On ne peut donc dissocier l'étude de la valeur du temps de celle du choix modal.

**Tableau n° 5.19 : comparaison des valeurs du temps (F/heure) selon les modèles étudiés**

|                                                 | Voiture | Train | Avion |
|-------------------------------------------------|---------|-------|-------|
| De Serpa (effets spécifiques par modes)         | 71      | 160   | 280   |
| Modèle avec effet « durée de trajet »           | 129     | 201   | 257   |
| Causse                                          | 141     | 163   | 330   |
| Modèle avec effet « revenu et durée de trajet » | 40      | 147   | 246   |

Les valeur du temps de l'avion et du train sont maintenant situées dans des fourchettes plus acceptables. De plus, la hiérarchie des modes de transport en fonction de la valeur du temps apparaît plus nettement.

Le modèle avec effet « durée de trajet » ainsi que le modèle de Causse fournissent des montants élevés pour la valeur du temps de la voiture (respectivement de 129 et 141 Fr/heure), alors que les deux autres modèles conduisent à des valeurs proches de celles qui sont fournies dans le tableau 5.1 (comprises entre 41 et 82 F/heure).

Dans notre modélisation, nous n'avons pas tenu compte du calcul de la valeur du temps en fonction du tarif de 2<sup>ème</sup> et 1<sup>ère</sup> classes. Il est donc plus difficile de comparer nos résultats avec ceux des autres modélisations françaises. Pour autant, nous constatons que nos valeurs se situent entre celles des seconde et première classes. En ce qui concerne l'aérien, la valeur du temps varie entre 250 et 330 F/heure. Ce résultat est compris entre la valeur plancher et la valeur plafond du tableau 6.1 (entre 256 et 359 F/heure).

Les modèles testés sont une généralisation du modèle de base de De Serpa. Or, le modèle le plus proche en termes d'évaluation de la valeur du temps est le modèle avec effet « revenu et durée de trajet ». Au vu de ces résultats, nos préférences vont vers ce modèle.

### 5.2.3 Segmentation selon le motif de déplacement

La segmentation par motif nous a permis, dans la section 4.4, à la fois de gagner en lisibilité sur la compréhension du comportement de choix modal et d'obtenir un gain conséquent de la qualité prédictive du modèle.

Le modèle avec effet « revenu et durée de trajet » appliqué au choix modal ne dégrade pas la qualité explicative du modèle. En effet, pour le motif professionnel, la log vraisemblance est de  $-727$ . Cette valeur est proche de celle du modèle présenté au tableau 4.21 du chapitre 4, (qui était de  $-726$ ). Pour le motif privé, nous obtenons un résultat similaire.

En ce qui concerne l'effet des variables socio-économiques sur le choix du mode de transport, nous obtenons les mêmes résultats que ceux observés dans la section 4, et ceci quel que soit le motif de déplacement.

Les résultats d'estimation de la segmentation par motif sont présentés dans le tableau n°5.20. On retrouve à nouveau des résultats similaires à ceux du chapitre 4, en particulier la faiblesse des effets de la plupart des variables individuelles pour les déplacements ayant un motif professionnel.

Les valeurs du temps calculées sur la base des estimations figurent dans le tableau 5.21 pour les déplacements privés et dans le tableau 5.22 pour les déplacements professionnels.

**Tableau n° 5.20 : estimation selon le motif du déplacement**

|                                                 | Motif Professionnel |              |              |              |              |              | Motif Privé  |              |              |              |              |              |
|-------------------------------------------------|---------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
|                                                 | Voiture             |              | Train        |              | Avion        |              | Voiture      |              | Train        |              | Avion        |              |
|                                                 | Coefficients        | t de Student | Coefficients | t de Student | Coefficients | t de Student | Coefficients | t de Student | Coefficients | t de Student | Coefficients | t de Student |
| <b>Caractéristiques de l'offre de transport</b> |                     |              |              |              |              |              |              |              |              |              |              |              |
| Coût de transport                               | -0,012              | -7,84        | -0,007       | -3,97        | -0,002       | -2,52        | -0,0071      | -14,61       | -0,0065      | -10,38       | -0,0030      | -10,62       |
| Temps*revenu <13                                | -0,030              | -6,56        | -0,028       | -5,94        | -0,014       | -1,91        | -0,0028      | -2,41        | -0,0012      | -1,38        | -0,0094      | -4,76        |
| Temps*revenu 13-20                              | -0,029              | -6,29        | -0,030       | -6,85        | -0,020       | -2,39        | -0,0050      | -4,38        | -0,0042      | -4,88        | -0,0127      | -6,55        |
| Temps*revenu >20                                | -0,027              | -7,00        | -0,025       | -5,87        | -0,009       | -1,47        | -0,0096      | -8,22        | -0,0072      | -7,84        | -0,0207      | -10,07       |
| Temps de transport au carré                     | 3,4E-05             | 5,24         | 2,2E-05      | 3,26         | 3,4E-05      | 5,24         | 4,9E-06      | 2,44         | -2,0E-06     | -1,72        | 2,0E-05      | 4,11         |
| <b>Caractéristiques de l'individu</b>           |                     |              |              |              |              |              |              |              |              |              |              |              |
| Age                                             | 0,059               | 3,96         | 0,001        | 0,11         |              |              | 0,0275       | 12,05        | 0,0294       | 12,88        |              |              |
| Homme                                           | -0,812              | -2,07        | -0,791       | -2,19        |              |              | 0,0175       | 0,22         | -0,0305      | -0,36        |              |              |
| PCS (Réf. Employé, agriculture)                 |                     |              |              |              |              |              |              |              |              |              |              |              |
| Cadre supérieur                                 | -1,043              | -2,37        | -1,426       | -3,29        |              |              | -0,3625      | -3,34        | -0,6216      | -5,77        |              |              |
| Profession intermédiaire                        | 0,158               | 0,35         | 0,246        | 0,56         |              |              | -0,1192      | -1,18        | -0,4301      | -4,12        |              |              |
| Ouvrier                                         | 2,256               | 2,49         | -1,215       | -1,07        |              |              | 0,6208       | 3,39         | 0,3643       | 2,10         |              |              |
| Nombre de voitures                              | 0,287               | 1,25         | -0,207       | -0,97        |              |              | 0,0554       | 1,00         | -0,4463      | -7,59        |              |              |
| distance parcourue en voiture                   | -9,7E-06            | -1,09        | -5,6E-05     | -5,65        |              |              | 4,7E-06      | 1,36         | -4,0E-05     | -9,86        |              |              |
| <b>Caractéristiques du déplacement</b>          |                     |              |              |              |              |              |              |              |              |              |              |              |
| Taille du groupe (réf. + de deux pers)          |                     |              |              |              |              |              |              |              |              |              |              |              |
| Une personne                                    |                     |              |              |              |              |              | -1,7066      | -15,23       | 0,6489       | 5,37         |              |              |
| Deux personnes                                  |                     |              |              |              |              |              | -0,9040      | -8,78        | 0,4076       | 3,38         |              |              |
| Durée du séjour (réf. Plus de trois jours)      |                     |              |              |              |              |              |              |              |              |              |              |              |
| une journée                                     | -1,292              | -3,26        | -1,053       | -2,74        |              |              | -1,6263      | -6,21        | -2,3904      | -8,31        |              |              |
| deux jours                                      | -0,947              | -2,21        | -1,258       | -3,06        |              |              | 1,1259       | 4,63         | 0,7439       | 2,79         |              |              |
| trois jours                                     | -0,681              | -1,50        | -0,435       | -0,99        |              |              | -0,6893      | -6,21        | -0,6581      | -5,75        |              |              |
| Constante                                       | 6,139               | 4,01         | 7,890        | 5,08         |              |              | 1,5700       | 4,85         | -0,4784      | -1,43        |              |              |
| Valeur inclusive                                |                     |              |              |              |              |              |              |              |              |              |              |              |
| Nombre d'observations                           | 1699                |              |              |              |              |              | 4739         |              |              |              |              |              |
| Log Vraisemblance à zéro                        | -1867               |              |              |              |              |              | -5206        |              |              |              |              |              |
| Log Vraisemblance de Béta                       | -727                |              |              |              |              |              | -2381        |              |              |              |              |              |

Tableau n° 5.21 : valeur du temps pour le motif privé

|                | 1 heure | 2 heures   | 3 heures | 4 heures    | 5 heures | 6 heures    |
|----------------|---------|------------|----------|-------------|----------|-------------|
| <i>Voiture</i> |         |            |          |             |          |             |
| Revenu <13     | 19      | 14         | 9        | 4           | -1       | -6          |
| Revenu 13-20   | 37      | 32         | 27       | 22          | 17       | 12          |
| Revenu >20     | 76      | 71         | 66       | 61          | 56       | 51          |
| <i>Train</i>   |         |            |          |             |          |             |
| Revenu <13     | 14      | 16         | 18       | 20          | 22       | 25          |
| Revenu 13-20   | 41      | 43         | 46       | 48          | 50       | 52          |
| Revenu >20     | 69      | 71         | 73       | 76          | 78       | 80          |
|                | 1 heure | 1 heure 30 | 2 heures | 2 heures 30 | 3 heures | 3 heures 30 |
| <i>Avion</i>   |         |            |          |             |          |             |
| Revenu <13     | 141     | 117        | 93       | 69          | 45       | 21          |
| Revenu 13-20   | 206     | 182        | 158      | 134         | 110      | 86          |
| Revenu >20     | 368     | 344        | 320      | 296         | 272      | 248         |

Le motif privé se comporte comme plus haut, mais avec des valeurs du temps qui sont beaucoup plus faibles, notamment en ce qui concerne le train pour lequel ces valeurs ne diffèrent guère de celles obtenues pour la voiture. On constate une croissance plus forte avec le revenu. La sensibilité à la durée de trajet est la même que dans les évaluations précédentes.

Tableau n° 5.22 : valeur du temps pour le motif professionnel

|                | 1 heure | 2 heures   | 3 heures | 4 heures    | 5 heures | 6 heures    |
|----------------|---------|------------|----------|-------------|----------|-------------|
| <i>Voiture</i> |         |            |          |             |          |             |
| Revenu <13     | 129     | 108        | 88       | 67          | 46       | 25          |
| Revenu 13-20   | 128     | 107        | 86       | 65          | 44       | 23          |
| Revenu >20     | 116     | 95         | 74       | 54          | 33       | 12          |
| <i>Train</i>   |         |            |          |             |          |             |
| Revenu <13     | 226     | 203        | 180      | 157         | 134      | 111         |
| Revenu 13-20   | 247     | 224        | 201      | 178         | 155      | 132         |
| Revenu >20     | 196     | 173        | 150      | 127         | 104      | 81          |
|                | 1 heure | 1 heure 30 | 2 heures | 2 heures 30 | 3 heures | 3 heures 30 |
| <i>Avion</i>   |         |            |          |             |          |             |
| Revenu <13     | 354     | 282        | 210      | 138         | 66       | 6           |
| Revenu 13-20   | 558     | 486        | 414      | 343         | 271      | 199         |
| Revenu >20     | Ns      | Ns         | ns       | ns          | Ns       | ns          |

Toutes les valeurs du temps observées sont très nettement supérieures à celles du motif privé. Quelque soit le mode de transport, la valeur du temps décroît avec la durée du trajet. En revanche, pour le train et la voiture, les personnes disposant d'un revenu élevé ont la plus faible valeur du temps.

Pour conclure, nous comparons nos valeurs du temps au point moyen, selon leurs motifs de déplacement. Ces résultats figurent dans le tableau 5.23.

**Tableau n° 5.23 : valeur du temps évaluée au point moyen**

|                      | Voiture | Train | Avion |
|----------------------|---------|-------|-------|
| Tous motif confondus | 40      | 147   | 246   |
| Privé                | 37      | 48    | 196   |
| Professionnel        | 75      | 161   | 312   |

Quelque soit le mode de transport utilisé, les valeurs du temps du motif professionnel sont toutes supérieures aux valeurs du temps du motif privé.

Le mode voiture reste dans les fourchettes fournies par le tableau 5.1. En revanche, pour l’avion et surtout pour le train, la valeur du temps pour les déplacements privés est inférieure aux valeurs plancher fournies par le rapport Boiteux.

Il est intéressant de comparer ces évaluations à celles données par l’estimation du modèle final du chapitre 4 qui correspond au modèle de Hensher avec effet de la durée du trajet mais sans effet revenu. On constate que ce dernier aboutit à des résultats peu crédibles, avec des valeurs du temps très élevées pour la voiture et, dans ce domaine, une faible différence entre motifs privé et professionnel.

**Tableau n° 5.24 : valeur du temps dans le modèle de Hensher avec effet durée du trajet.**

|                      | Voiture | Train | Avion |
|----------------------|---------|-------|-------|
| Tous motif confondus | 152     | 201   | 245   |
| Privé                | 141     | 64    | 196   |
| Professionnel        | 173     | 261   | Ns.   |

## 5.3 Etude de l'effet des variables explicatives sur le choix modal

L'objectif principal de la modélisation est d'analyser les effets des facteurs de la demande et de l'offre de transport sur les probabilités du choix modal. Pour cela, nous allons utiliser trois outils d'interprétation des modèles : utilité marginale, probabilité marginale et élasticité.

- étant donné un groupe de valeurs de variables explicatives, on analyse les effets marginaux d'une variable explicative sur l'utilité de chaque alternative,
- étant donné un groupe de valeurs de variables explicatives, on analyse les effets marginaux d'une variable explicative sur la probabilité de choix, ou l'élasticité de la probabilité sur les autres variables,
- enfin, étant donné un groupe de valeurs de variables explicatives, on mesure l'élasticité de la probabilité du choix d'un mode de transport relativement aux variables explicatives, en s'intéressant spécifiquement à celles qui décrivent l'offre de transport.

Ces indicateurs ont été calculé à partir du modèle complet estimé dans la section précédente (cf. tableau n°5.17). Ce modèle permet de prendre en compte un effet croisé entre le revenu et le temps de transport, et la durée de trajet. Nous allons aussi analyser l'effet des variables d'offre et de demande selon le motif de déplacement (cf. tableau n°5.20).

### 5.3.1 Effets sur l'utilité de chacun des modes de transport

le tableau n°5.25 reprend les coefficients des variables d'offre de transport, ces dernières ayant été renormalisées en centaines de francs pour les coûts et en heures pour les temps de transport. Ce choix paraissant mieux correspondre que les minutes et les francs à des déplacements longue distance qui souvent prennent plusieurs heures et dont le coût peut atteindre voire dépasser les 2 000 fr.



Tableau n° 5.25: effets marginaux des variables d’offre sur l’utilité.

|                                             | voiture | Train  | Avion  |
|---------------------------------------------|---------|--------|--------|
| <b>Tous motifs confondus</b>                |         |        |        |
| Coût de transport par unités de 0,1KF       | -0,810  | -0,352 | -0,231 |
| Temps en heures (Revenu inférieur à 130 KF) | -0,372  | -0,342 | -0,729 |
| Temps en heures (Revenu entre 130 et 200KF) | -0,584  | -0,614 | -1,246 |
| Temps en heures (Revenu supérieur à 200 KF) | -0,738  | -0,655 | -1,337 |
| <b>Motifs privés</b>                        |         |        |        |
| Coût de transport par unités de 0,1KF       | -0,711  | -0,648 | -0,299 |
| Temps en heures (Revenu inférieur à 130 KF) | -0,169  | -0,074 | -0,566 |
| Temps en heures (Revenu entre 130 et 200KF) | -0,300  | -0,253 | -0,761 |
| Temps en heures (Revenu supérieur à 200 KF) | -0,578  | -0,433 | -1,244 |
| <b>Motifs professionnels</b>                |         |        |        |
| coût de transport par unités de 0,1KF       | -1,185  | -0,576 | -0,172 |
| Temps en heures (Revenu inférieur à 130 KF) | -1,781  | -1,684 | -0,856 |
| Temps en heures (Revenu entre 130 et 200KF) | -1,759  | -1,830 | -1,208 |
| Temps en heures (Revenu supérieur à 200 KF) | -1,625  | -1,480 | -0,515 |

Ces coefficients s’interprètent évidemment comme des effets marginaux sur l’utilité du mode de transport concernés :

$$U_i = \sum X_{ik} b_{ik} \Rightarrow b_{ik} = \partial U_i / \partial X_{ik}$$



Rappelons que, pour le modèle logit, il y a également une interprétation plus intéressante, issue de la formule suivante :

$$\ln \frac{p_i}{p_j} = \sum_k (X_{ik} b_{ik} - X_{jk} b_{jk}) \Rightarrow b_{ik} = \frac{\partial \ln p_i / p_j}{\partial X_{ik}}$$

ce qui signifie que ces coefficients s’interprètent comme des effets marginaux sur le logarithme de la probabilité relative  $p_i/p_j$  d’un mode de transport à l’autre, connue dans la littérature anglo-saxonne sous le nom de « log-odds ratio ».

Ainsi, un accroissement du temps de transport en voiture d’une heure par rapport aux autres modes de transport ferait baisser le logarithme de la part relative de la voiture par rapport aux autres modes de transport de  $-0,372$  pour les revenus faibles, de  $-0,584$  pour les revenus moyens et de  $-0,738$  pour les revenus élevés.

Trois grands résultats émergent de ce tableau :

- Les effets marginaux de la durée de déplacement sont croissants avec le niveau de revenu, quel que soit le mode de transport. Cette croissance des effets marginaux est pour l'essentiel le fait des déplacements pour motifs privés. Elle n'est pas observable sur les déplacements pour motifs professionnels.
- Les effets marginaux du coût de transport sont plus élevés pour la voiture que pour le train et pour le train que pour l'avion. Cette hiérarchie est valable pour les motifs privés comme pour les motifs professionnels, tout en étant plus marquée pour ces derniers.
- Tous motifs confondus, l'effet marginal de la durée de déplacement est plus important sur l'avion que sur les deux autres modes de transport et ce quelque soit le niveau de revenu. Il y a cependant, là aussi, de très fortes différences entre motifs. Si, pour les motifs privés (largement majoritaires), on retrouve ces mêmes différences, on observe l'inverse sur les déplacements pour motifs professionnels.

Avec le tableau n°5.26, on passe aux effets des variables influençant la demande de transport, c'est à dire pour l'essentiel les caractéristiques de l'individu et le type de déplacement effectué.

Tableau n° 5.26 : effets des variables de demande sur l'utilité marginale.

|                                         | Tous motifs confondus |                 | Motif prive       |                 | Motif professionnel |                 |
|-----------------------------------------|-----------------------|-----------------|-------------------|-----------------|---------------------|-----------------|
|                                         | Voiture vs, Avion     | Train vs, Avion | Voiture vs, Avion | Train vs, Avion | Voiture vs, Avion   | Train vs, Avion |
| <b>Caractéristiques de l'individu</b>   |                       |                 |                   |                 |                     |                 |
| Age                                     | 0,020                 | 0,021           | 0,028             | 0,029           | 0,059               | 0,001           |
| Homme                                   | -0,006                | 0,084           | 0,018             | -0,031          | -0,812              | -0,791          |
| PCS (réf. Employé)                      |                       |                 |                   |                 |                     |                 |
| Cadre supérieur                         | -0,040                | -0,372          | -0,363            | -0,622          | -1,043              | -1,426          |
| Profession intermédiaire                | 0,357                 | 0,234           | -0,119            | -0,430          | 0,158               | 0,246           |
| Ouvrier                                 | 1,307                 | 0,477           | 0,621             | 0,364           | 2,256               | -1,215          |
| Nombre de voitures                      | 0,106                 | -0,320          | 0,055             | -0,446          | 0,287               | -0,207          |
| Distance parcourue en voiture           | 0,0008                | -0,0037         | 0,0005            | -0,0040         | -0,0010             | -0,0056         |
| <b>Caractéristiques du déplacement</b>  |                       |                 |                   |                 |                     |                 |
| Taille du groupe (réf. + de deux pers.) |                       |                 |                   |                 |                     |                 |
| Une personne                            | -1,718                | 0,731           | -1,707            | 0,649           |                     |                 |
| Deux personnes                          | -0,978                | 0,589           | -0,904            | 0,408           |                     |                 |
| Motif de déplacement (réf. Visite)      |                       |                 |                   |                 |                     |                 |
| Professionnel                           | -1,310                | -0,831          |                   |                 |                     |                 |
| Vacances                                | 0,966                 | -0,068          |                   |                 |                     |                 |
| Loisirs                                 | 0,548                 | -0,179          |                   |                 |                     |                 |
| Durée de séjour (réf. + de trois jours) |                       |                 |                   |                 |                     |                 |
| Une journée                             | -0,354                | -0,883          | -1,626            | -2,390          | -1,292              | -1,053          |
| Deux jours                              | -0,252                | -0,648          | 1,126             | 0,744           | -0,947              | -1,258          |
| Trois jours                             | -0,500                | -0,565          | -0,689            | -0,658          | -0,681              | -0,435          |

La plupart de ces variables sont dichotomiques et leur valeur est la même quel que soit le mode utilisé. On a donc, en utilisant l'indice 0 pour la situation de référence,

$$\ln \frac{p_i}{p_0} = \sum_k X_k b_{ik} \Rightarrow b_{ik} = \left( \ln \frac{p_i}{p_0} \right)_{X_k=1} - \left( \ln \frac{p_i}{p_0} \right)_{X_k=0} \equiv \Delta \ln \frac{p_i}{p_0} \Rightarrow \exp b_{ik} - 1 = \frac{\Delta(p_i/p_0)}{p_i/p_0}$$

Dans ce cas, les exponentielles des coefficients estimés nous indiquent de combien varie la probabilité relative du choix d'un mode de transport relativement à un autre quand on modifie une des caractéristiques de l'individu ou du type de déplacement par rapport à la situation de référence. Afin de faciliter l'interprétation des résultats, on reprend dans le tableau n°5.27 les valeurs de  $\exp b_{ik} - 1$  pour celles des variables qui sont dichotomiques.

**Tableau n° 5.27 : effets des variables de demande dichotomiques sur la probabilité relative du choix d'un mode de transport par rapport à l'autre**

|                                         | Tous motifs confondus |                 | Motif prive       |                 | Motif professionnel |                 |
|-----------------------------------------|-----------------------|-----------------|-------------------|-----------------|---------------------|-----------------|
|                                         | Voiture vs, Avion     | Train vs, Avion | Voiture vs, Avion | Train vs, Avion | Voiture vs, Avion   | Train vs, Avion |
| <b>Caractéristiques de l'individu</b>   |                       |                 |                   |                 |                     |                 |
| Homme                                   | -0,006                | 0,088           | 0,018             | -0,030          | -0,556              | -0,547          |
| PCS (réf. Employé)                      |                       |                 |                   |                 |                     |                 |
| Cadre supérieur                         | -0,039                | -0,311          | -0,304            | -0,463          | -0,648              | -0,760          |
| Profession intermédiaire                | 0,429                 | 0,264           | -0,112            | -0,350          | 0,171               | 0,279           |
| Ouvrier                                 | 2,695                 | 0,611           | 0,860             | 0,440           | 8,545               | -0,703          |
| <b>Caractéristiques du déplacement</b>  |                       |                 |                   |                 |                     |                 |
| Taille du groupe (réf. + de deux pers.) |                       |                 |                   |                 |                     |                 |
| Une personne                            | -1,718                | 0,731           | -1,7066           | 0,6489          |                     |                 |
| Deux personnes                          | -0,978                | 0,589           | -0,904            | 0,4076          |                     |                 |
| Motif de déplacement (réf. Visite)      |                       |                 |                   |                 |                     |                 |
| Professionnel                           | -0,730                | -0,564          |                   |                 |                     |                 |
| Vacances                                | 1,627                 | -0,066          |                   |                 |                     |                 |
| Loisirs                                 | 0,730                 | -0,164          |                   |                 |                     |                 |
| Durée de séjour (réf. + de trois jours) |                       |                 |                   |                 |                     |                 |
| Une journée                             | -0,298                | -0,586          | -0,803            | -0,908          | -0,725              | -0,651          |
| Deux jours                              | -0,223                | -0,477          | 2,083             | 1,104           | -0,612              | -0,716          |
| Trois jours                             | -0,393                | -0,432          | -0,498            | -0,482          | -0,494              | -0,353          |

Les différences entre catégories socio-professionnelles sont fortes et alors mêmes que, au moins en partie, les effets de revenus ont été pris en compte. Tous motifs confondus, quand on monte dans la hiérarchie sociale, les parts relatives de la voiture et du train tendent à baisser, la première plus fortement que la seconde, au profit de l'avion. Cette modification apparaît aussi bien dans les déplacements professionnels que pour les déplacements privés.

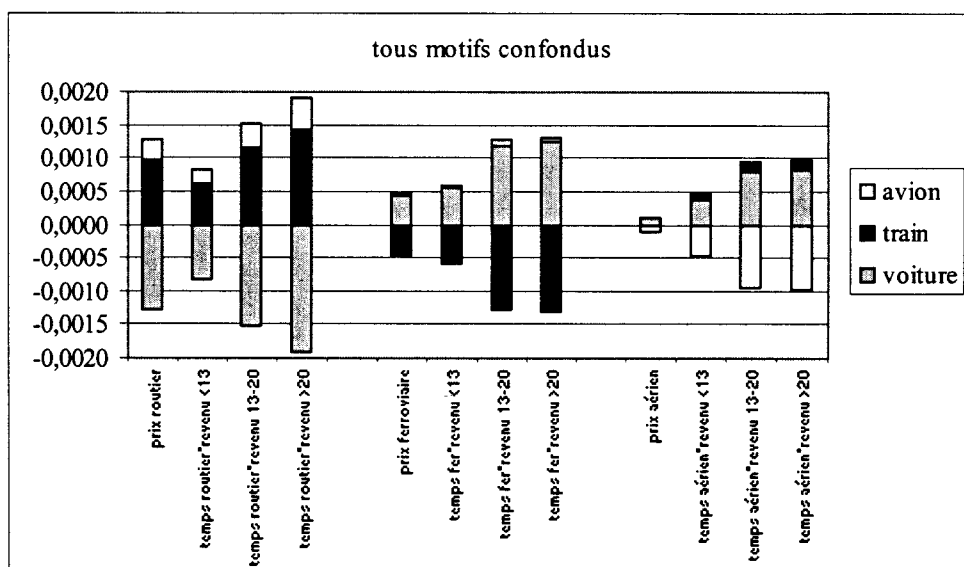
Du côté des caractéristiques des déplacements, on constate que le fait de voyager à plusieurs fait augmenter la part de la voiture par rapport au train et à l'avion. Pour les séjours courts, le choix du mode de transport se portera plutôt sur l'avion, en particulier pour les motifs professionnels. Pour les motifs privés, la situation est plus complexe, les déplacements de deux jours se faisant moins fréquemment en avion que les déplacements plus courts et plus longs. Il s'agit de déplacements de type loisir ou visite qui se réalisent en général le week-end et il y a très peu de déplacement en avion pour ce motif.

### 5.3.2 Analyse des effets marginaux sur la probabilité de choix d'un mode

A partir des coefficients, nous avons calculé des effets marginaux des variables d'offre sur les probabilités de choix. Le modèle logit étant hautement non linéaire, ces probabilités diffèrent d'un individu à l'autre et d'un déplacement à l'autre. Deux choix sont alors possibles : calculer les effets marginaux pour chaque individu de l'échantillon et déterminer à partir de là l'effet moyen ; ou déterminer un « individu moyen » et un « déplacement moyen » et calculer, pour ce déplacement, l'effet marginal. Pour des raisons de commodité de calcul, c'est cette dernière voie que nous avons choisie, et dont on trouvera les résultats annexe n°6.

Nous ferons ici une représentation graphique de ces effets. Les graphiques de 5.5 à 5.7 présentent les effets des variables d'offres sur les probabilités de choix selon le motif de déplacement. Pour cela, nous avons réalisé un histogramme empilé, qui nous permet de comparer entre eux les effets du coût et du temps de déplacement pour chacune des tranches de revenu sur les probabilités de choix modal. La partie inférieure de chaque histogramme représente les effets propres (de l'offre d'un mode de transport sur la probabilité qu'il soit choisi), la partie supérieure empile les effets croisés (de l'offre d'un mode de transport sur la probabilité de choix des autres modes).

**Graphique n° 5.5 : effets des variables d'offre sur les probabilités marginales**

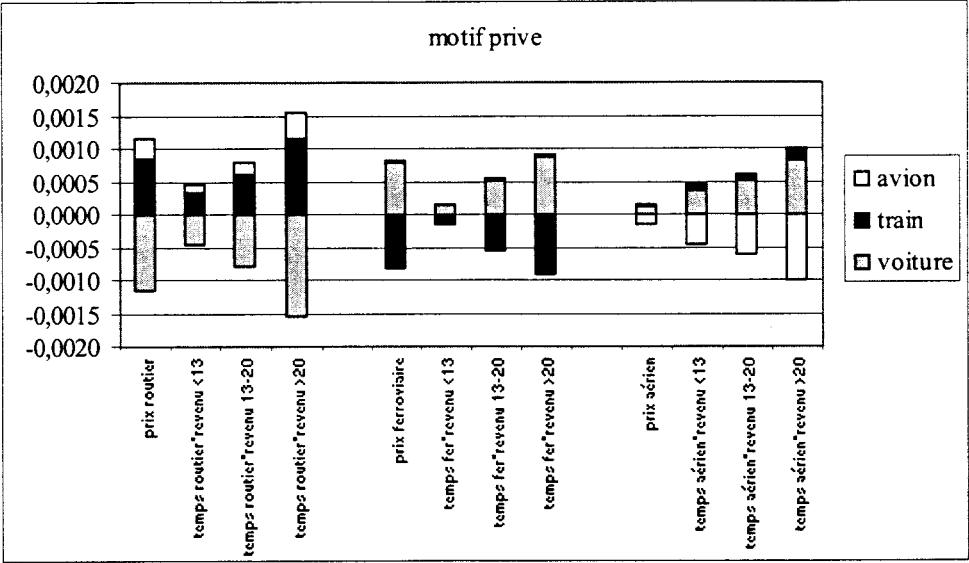


Ainsi, à titre d'exemple, une augmentation d'un franc du coût de déplacement en voiture entraîne une diminution de la probabilité de choisir ce mode de 0,00128 ; tandis que les probabilités de choisir le train et l'avion augmentent respectivement de 0,00096 et 0,00032. Une augmentation d'une minute de la durée de déplacement en voiture entraîne une baisse de 0,00083 de la probabilité qu'une personne de revenus moyens choisisse ce mode ; tandis que les probabilités qu'elle choisisse le train et l'avion augmentent respectivement de 0,00062 et 0,00021.

Pour le coût comme pour le temps, les résultats tous déplacements confondus sont similaires à ceux qu'on avait obtenus sur la base des effets marginaux sur l'utilité. Du côté des coûts, les effets marginaux, propres et croisés, des coûts et des durées de déplacement en voiture sont plus importants que les effets des coûts et des durées de déplacement en train, eux-mêmes plus importants que les effets des coûts et des durées de déplacement en avion. Ceci tient sans doute, au moins pour partie, à la hiérarchie des parts de chacun de ces modes, la voiture étant fortement dominante et le train nettement plus fréquent que l'avion. Enfin, du côté de la sensibilité aux durées de déplacement, quel que soit le mode concerné, on retrouve la sensibilité croissante à cette durée avec le niveau de revenu. Ce résultat est vrai aussi bien pour les effets directs que pour les effets croisés.

Comme le montre le graphique n°5.6, on aboutit à des constats similaires quand on examine les seuls déplacements pour motifs privés. La hiérarchie des effets par modes est cependant moins nette, les effets directs et croisés des durées de déplacement en train et en avion étant de niveaux similaires pour les revenus moyens et élevés.

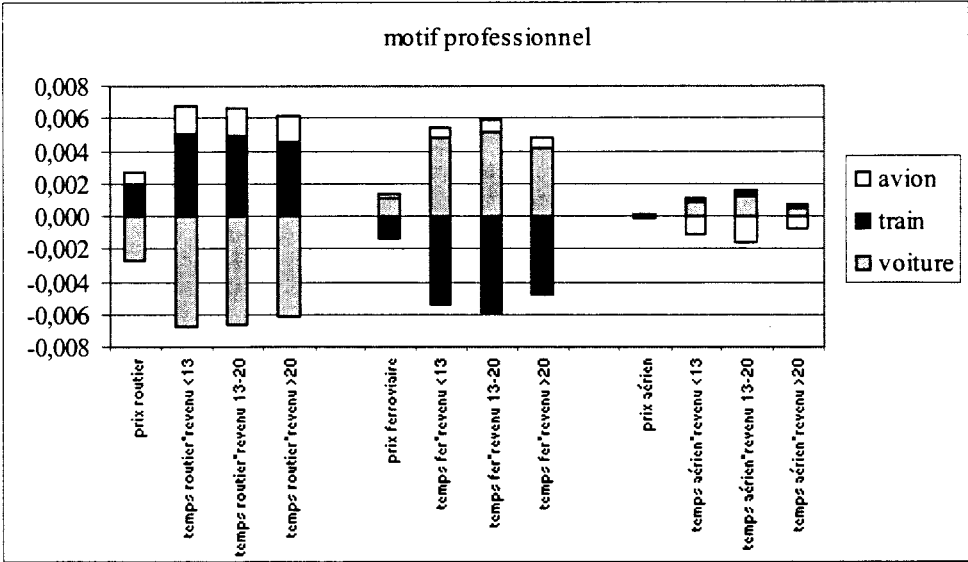
**Graphique n°5.6 : effets des variables d'offre sur les probabilités marginales pour le motif privé**



Le graphique n°5.7 fait apparaître quelles différences importantes entre déplacements professionnels par rapport aux déplacements pour motifs privés, qui confirment pour l'essentiel les conclusions auxquelles nous avons conduit l'analyse des utilités marginales. En premier lieu, qu'ils soient directs ou croisés, qu'ils proviennent d'une variation de coût ou d'une modification de durée, les effets marginaux sur les probabilités de choix de transport sont plus faibles pour les déplacements professionnels que pour les déplacements privés.

En second lieu, les déplacements professionnels apparaissent relativement moins sensibles aux coûts et relativement plus sensibles à la durée que les déplacements privés. C'est la conséquence d'une valeur du temps plus élevée pour ce type de déplacements. Enfin, on retrouve le fait que, pour ce type de déplacements, le revenu n'influence plus les probabilités marginales. Les effets directs et croisés des durées de déplacement ne varient guère d'une tranche de revenu à l'autre et ce quelque soit le mode de transport utilisé.

**Graphique n°.5.7 : effets des variables d’offre sur les probabilités marginales selon le motif professionnel**



**5.3.3 les élasticités directes et croisées**

Comme pour les effets marginaux, les valeurs des élasticités dépendent de manière non linéaire des caractéristiques des déplacements. On se retrouve devant la même alternative : calculer l'élasticité moyenne de notre échantillon comme une moyenne pondérée d'élasticités individuelles. C'est une méthode très lourde car elle nécessite le calcul pour chaque individu d'une élasticité propre et croisée dans chacun des modes. Ou calculer directement une élasticité agrégée avec un temps moyen et la part de marché observée. Laferrière (1993) montre que les écarts entre les deux méthodes sont minimales. Pour cette raison, et parce qu'elle simplifie beaucoup les calculs, nous utilisons cette méthode pour le calcul des élasticités prix et des élasticités temps, selon le revenu

Le tableau n°5.28 présente les élasticités directes des variables d'offre de transport en valeur moyenne, tous modes de transport confondus. Si le temps de transport en voiture augmente de 1% pour un revenu de moins de 130 000 fr., la probabilité de choisir la route diminue de 0,445%, et celle de choisir le train et l'avion augmente de 1,779%.



Tableau n°5.28 : élasticités directes sur les variables d’offre

|                                   | Voiture | Train  | Avion  |
|-----------------------------------|---------|--------|--------|
| prix routier                      | -0,445  | 1,779  | 1,779  |
| prix ferroviaire                  | 0,108   | -0,610 | 0,108  |
| prix aérien                       | 0,035   | 0,035  | -0,672 |
| <b>Revenu inférieur à 130 KF</b>  |         |        |        |
| temps routier                     | -0,049  | 0,197  | 0,197  |
| temps ferroviaire                 | 0,036   | -0,202 | 0,036  |
| temps aérien                      | 0,006   | 0,006  | -0,108 |
| <b>Revenu entre 130 et 200 KF</b> |         |        |        |
| temps routier                     | -0,084  | 0,335  | 0,335  |
| temps ferroviaire                 | 0,073   | -0,414 | 0,073  |
| temps aérien                      | 0,012   | 0,012  | -0,224 |
| <b>Revenu supérieur à 200 KF</b>  |         |        |        |
| temps routier                     | -0,190  | 0,758  | 0,758  |
| temps ferroviaire                 | 0,133   | -0,752 | 0,133  |
| temps aérien                      | 0,025   | 0,025  | -0,482 |

On constate que, du côté des coûts, la hiérarchie des élasticités directes correspond à celles des modes de transport : elles sont un peu plus fortes pour l’avion que pour le train, nettement plus fortes pour ce dernier que pour la voiture. On notera également la valeur très élevée des élasticités croisées des probabilités de choix du train et de l’avion par rapport au coût des déplacements en voiture. Les autres élasticités croisées sont faibles.

Du côté des durées, quel que soit le niveau de revenu, les élasticité directes et croisées du mode ferroviaire sont les plus élevées, suivies de l’avion puis de la voiture. On retrouve également l’importance des élasticités croisées des probabilités de choix du train et de l’avion par rapport à la durée de déplacement en voiture. Enfin, qu’elles soient directes ou croisées, les élasticités croissent quand on passe de la tranche de revenus la plus faible à la plus élevée.

L’étude des élasticités selon le motif de déplacement montre que la segmentation retenue confirme l’existence de niveau de sensibilité différente d’un motif à l’autre (cf. tableau n°5.29). Quelques exceptions mises à part, les élasticités directes et croisées sont plus fortes pour les déplacements pour motifs privés que pour les déplacements professionnels. Cette question de niveau mise à part, globalement, on retrouve des hiérarchies similaires entre élasticités pour les deux types de déplacements. En particulier, on constate que la croissance des élasticités avec le niveau de revenu observée pour l’ensemble des déplacements est valable pour les motifs professionnels aussi bien que pour les motifs privés. On remarquera également que les élasticités croisées des probabilités de choix du train et de l’avion par rapport à la durée de déplacement en voiture sont beaucoup plus faibles quand on décompose

par motifs (qu'il s'agisse des déplacements privés ou professionnels). Ce qui laisse à penser que les résultats auxquels nous sommes parvenus sur l'ensemble des déplacements est, au moins pour une partie, le résultat de l'agrégation des motifs.

**Tableau n°5.29 : élasticités directes sur les variables d'offre selon le motif de déplacement**

|                                   | Motif privé |        |        | motif professionnel |        |        |
|-----------------------------------|-------------|--------|--------|---------------------|--------|--------|
|                                   | Voiture     | Train  | Avion  | voiture             | train  | avion  |
| prix routier                      | -0,472      | 1,675  | 1,675  | -0,746              | 1,386  | 1,386  |
| prix ferroviaire                  | 0,212       | -0,632 | 0,212  | 0,179               | -0,508 | 0,179  |
| prix aérien                       | 0,038       | 0,038  | -0,743 | 0,060               | 0,060  | -0,603 |
| <b>Revenu inférieur à 130 KF</b>  |             |        |        |                     |        |        |
| temps routier                     | -0,057      | 0,123  | 0,123  | -0,054              | 0,100  | 0,100  |
| temps ferroviaire                 | 0,012       | -0,234 | 0,012  | 0,006               | -0,103 | 0,006  |
| temps aérien                      | 0,005       | 0,005  | -0,132 | 0,036               | 0,036  | -0,065 |
| <b>Revenu entre 130 et 200 KF</b> |             |        |        |                     |        |        |
| temps routier                     | -0,091      | 0,191  | 0,191  | -0,114              | 0,212  | 0,212  |
| temps ferroviaire                 | 0,036       | -0,451 | 0,036  | 0,091               | -0,258 | 0,091  |
| temps aérien                      | 0,007       | 0,007  | -0,260 | 0,017               | 0,017  | -0,170 |
| <b>Revenu supérieur à 200 KF</b>  |             |        |        |                     |        |        |
| temps routier                     | -0,186      | 0,606  | 0,606  | -0,409              | 0,759  | 0,759  |
| temps ferroviaire                 | 0,099       | -0,744 | 0,099  | 0,052               | -0,769 | 0,052  |
| temps aérien                      | 0,021       | 0,021  | -0,501 | 0,270               | 0,270  | -0,526 |

## 5.4 Conclusion

Une comparaison exhaustive des propositions faites dans le chapitre 1 sur la valeur du temps a pu être menée dans ce chapitre. Nous avons mis en évidence le lien étroit entre la valeur du temps, le revenu et la durée du trajet. Le modèle de Causse et le modèle avec effet « revenu et durée du trajet » sont les seuls à intégrer explicitement ces hypothèses. Mais dans notre problématique de construction d'un modèle de choix modal sur la longue distance, le modèle avec effet « revenu et durée du trajet » est le plus satisfaisant. Il offre des valeurs du temps plus conforme avec les valeurs observées dans le rapport Boiteux.

L'étude de l'effet des variables explicatives sur le choix modal montre :

- Quand on monte dans la hiérarchie sociale, les parts relatives de la voiture et du train tendent à baisser au profit de l'avion, et ceci quelque le motif de déplacement. Pour les séjours courts et les déplacements individuels, le choix du mode de transport se portera plutôt sur l'avion, en particulier pour le motif professionnel.
- Les effets marginaux de la durée de déplacement sont croissants avec le niveau de revenu, quelque soit le mode de transport.
- Les usagers de la voiture ont des élasticités prix plus faibles que ceux des autres de modes de transport.
- Les élasticités du coût et du temps de transport sont plus faibles pour les déplacements pour motif professionnel que pour les déplacements pour motif privé.

## CONCLUSION DE LA SECONDE PARTIE

Nous avons construit un échantillon sur les déplacements observés dans l'enquête transport en sélectionnant les zones d'emplois qui sont localisées sur les quatre axes disposant d'une desserte TGV (axe Nord, axe Sud-Est, axe Ouest et axe Sud-Ouest). Ce zonage ainsi que les hypothèses retenues pour la construction des variables d'offre ont permis de mettre en évidence les résultats suivants :

- la nature de la forme fonctionnelle de l'utilité représentative est quadratique sur les variables de temps de transport, cela signifie qu'un individu est prêt à perdre plus facilement une demi-heure sur un très long trajet que sur un court trajet.
- L'analyse des méthodes d'estimations, nous a conduit à préférer le modèle logit emboîté.
- Segmentation par motif nous permet de gagner à la fois en lisibilité sur la compréhension du comportement de choix modal et en qualité de prévision du modèle.
- La méthode d'énumération d'échantillons aléatoires pour l'agrégation des probabilités de choix individuels permet d'obtenir des estimations agrégées satisfaisantes.
- La fonction de la valeur du temps dépend du revenu, de la durée du trajet, du mode de transport et du motif de déplacement.
- La valeur du temps pour le motif de déplacement professionnel est supérieur à la valeur du temps pour motif privé.
- Pour tous les motifs confondus les élasticités directes du coût de transport respectent une hiérarchie des modes de transport, l'ordre est le suivant : l'avion (-0,672), le train (-0,61) et la voiture (-0,445).
- Les élasticités directes et croisées du coût et du temps de déplacement sont plus fortes pour les déplacements pour motifs privés que pour les déplacements professionnels.

## CONCLUSION GENERALE

Trop souvent l'économetre procède en aveugle quant à la spécification des formes fonctionnelles des fonctions d'utilité indirectes, sans s'interroger sur la pertinence microéconomique de ces fonctions. Ainsi, la plupart des études se contentent de répliquer les formes courantes en terme de coût généralisé. Ce constat nous a amené à nous poser les questions qui suivent :

Quelles variables est-il légitime d'incorporer dans l'utilité représentative, sous quelles formes mathématiques, sachant que cette fonction d'utilité est dérivée d'un programme individuel d'affectation des ressources, jugé le plus pertinent en matière temporelle ?

Quelles modélisations économétriques faut-il utiliser pour l'estimation d'un modèle de choix modal en tenant compte de cette fonction d'utilité ?

Aucune conclusion définitive ne ressort. Des premières tentatives de réponse développées par Train et McFadden (1978), et plus tard par Jara-Diaz (1994). De plus, comme ces modèles s'appliquent plus généralement dans le cadre de déplacement urbain, ils ont été écartés de notre analyse. En revanche, en s'appuyant sur le cadre allocatif de De Serpa, Truong et Hensher (1985a), nous aboutissons à une formulation théorique plus achevée pour traiter du problème de l'affectation temporelle dans un contexte de choix modal. La dérivation proposée par ces deux auteurs et perfectionnée par Bates (1987), est remarquable tant par sa simplicité que par l'opportunité des conclusions auxquelles elle aboutit. Ces dernières permettent en effet de valider l'approche en terme de coût généralisé, jusque là largement utilisée de

manière ad hoc. L'analyse de Bates et Roberts (1986), reprise dans le groupe de travail de MVA (1987), applique la problématique du choix modal au modèle de De Serpa. En outre, si nous relâchons les contraintes sur l'utilité marginale du temps, Truong et Hensher (1985b) montrent que la valeur du temps est fonction à la fois du temps de déplacement et de son prix. Enfin Causse (1999) propose une dérivation générale de la forme analytique de la fonction d'utilité indirecte et aboutit à une fonction de la valeur du temps qui dépend en plus du temps de déplacement, de son prix et du revenu de l'individu.

Concernant la seconde question, nous nous sommes appuyés sur la théorie des choix discrets pour modéliser le choix du mode de transport. Parmi les modèles économétriques existants dans cette théorie, nous avons testé la pertinence de ces modèles par rapport à notre problématique. Nous avons obtenu les conclusions suivantes.

La fonction d'utilité indirecte est de nature quadratique sur la variable temps de transport. La désutilité du temps est plus faible sur les déplacements longs que sur les déplacements courts. Ce résultat confirme la proposition faite par Truong et Hensher (1985b).

Par ailleurs, nos investigations sur le choix d'un modèle économétrique qui satisferait à la fois le critère de qualité prédictive et de qualité explicative nous ont amené à retenir le modèle logit emboîté. Le test d'Hausman et McFadden nous a conduit à rejeter l'hypothèse d'indépendance des alternatives non pertinentes. Le modèle emboîté peut tenir compte des interdépendances entre les alternatives. D'autres modèles peuvent tenir compte de ces biais. On retrouve le modèle probit polytomique (MNP). Ce dernier donne un degré considérable de flexibilité concernant la prise en considération des interdépendances entre les modalités. Selon les hypothèses faite par le MNP, ces interdépendances viennent de la structure de corrélation entre les erreurs spécifiques aux modalités. Pour plusieurs applications des modèles de choix polytomique, la possibilité d'admettre des modalités interdépendantes est une nécessité. Une source supplémentaire d'interdépendance entre les modalités peut aussi provenir du phénomène d'hétérogénéité entre individus. La principale difficulté liée à l'utilisation du modèle MNP vient du calcul des probabilités de choix qui sont exprimées sous forme d'intégrales multidimensionnelles. Elle en rend, de manière générale, l'estimation très délicate.

Pour améliorer la qualité prédictive et explicative du modèle, nous avons réalisé une segmentation par motif de déplacement (privé et professionnel). Ceci nous a permis d'offrir une lisibilité accrue sur le comportement du choix modal sur la longue distance. En ce qui concerne le motif privé, les résultats ne varient pas de ceux obtenus dans l'étude incluant tous les motifs possibles de déplacement. Pour le motif professionnel, seules les caractéristiques socioprofessionnelles de l'individu sont pertinentes. De plus, ce sont les entreprises qui se trouvent le plus souvent à l'origine des déplacements professionnels des individus. Dans ces conditions, ce sont elles qui déterminent également le mode de transport utilisé. Par conséquent, il serait opportun de réaliser une étude complémentaire destinée à clarifier le comportement de ces firmes.

En outre, l'étude sur les méthodes d'agrégation a montré que la méthode d'énumération complète était la meilleure, mais celle-ci reste très lourde à mettre en œuvre. Une solution pour alléger les calculs consiste à utiliser la méthode de l'énumération de l'échantillon aléatoire. Nous avons montré qu'elle offre des résultats proches de la méthode d'énumération complète.

La deuxième problématique de la thèse concernait les problèmes d'évaluation de la valeur du temps. En effet, la partie théorique de notre travail ne nous a permis de dégager aucune forme particulière pour la nature fonctionnelle de la valeur du temps. Dans ces conditions, nous avons exploité les tests économétriques pour tenter de déterminer cette forme. Pour cela, nous avons passé en revue l'ensemble des modèles, depuis le plus ancien (le modèle de Becker, 1965) jusqu'au plus récent (celui de Causse, 1999) en passant par celui de Serpa (1971). Sur le plan théorique et empirique, nous avons mis en évidence un lien étroit entre la valeur du temps, le revenu et la durée du trajet. De fait, notre travail enrichit l'analyse de Causse (1999). En effet, si cet auteur avait déjà souligné les relations théoriques entre ces différents éléments, son analyse souffrait d'un problème d'inadéquation entre la formulation théorique du modèle et son estimation : les signes des coefficients estimés étaient différents des signes attendus. En revanche, le modèle que nous proposons (modèle avec effet « revenu et durée du trajet ») surmonte les difficultés rencontrées par le modèle de Causse (1999).

Enfin, dans une problématique de construction d'un modèle de choix modal sur la longue distance, le modèle avec effet « revenu et durée du trajet » est le plus satisfaisant. Il offre des valeurs du temps plus conformes avec les valeurs observées dans le rapport Boiteux. A partir de ce modèle, nous avons réalisé une segmentation par motif de déplacement. Quel que soit le mode de transport utilisé, les valeurs du temps du motif professionnel sont toutes supérieures aux valeurs du temps du motif privé.

Une étude comparative succincte des méthodes révélée et déclarée devrait être mener pour l'estimation des modèles de choix discrets. Nous pourrions ainsi vérifier la cohérence d'une part des valeurs du temps obtenues et d'autre part du comportement de choix modal sur la longue distance.



## TABLE DES GRAPHIQUES

|                                                                                                                                                                         |     |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Graphique n°3.1 : répartition modale selon la date .....                                                                                                                | 107 |
| Graphique n°3.2 :répartition modale selon la classe de distance.....                                                                                                    | 108 |
| Graphique n°4.1 : Log vraisemblance en fonction de Lambda .....                                                                                                         | 129 |
| Graphique n°4.2 : désutilité du temps de transport .....                                                                                                                | 134 |
| Graphique n°4.3 : évolution des parts modales en fonction du temps voiture Méthode d'agrégation<br>directe à partir du modèle logit conditionnel .....                  | 156 |
| Graphique n°4.4 : évolution des parts modales en fonction du temps voiture Méthode d'agrégation<br>directe à partir du modèle logit logarithmique.....                  | 157 |
| Graphique n°4.5 : Erreur d'agrégation .....                                                                                                                             | 158 |
| Graphique n°4.6 : évolutions des parts modales en fonction du temps voiture Méthode d'énumération<br>complète à partir du modèle logit conditionnel .....               | 159 |
| Graphique n°4.7 : évolution des parts modales en fonction du temps voiture, Méthode d'agrégation<br>Talvitie à partir du modèle logit conditionnel .....                | 160 |
| Graphique n°4.8 : évolution des parts modales en fonction du temps voiture Méthode d'intégration<br>explicite à partir du modèle logit conditionnel .....               | 162 |
| Graphique n°4.9 : Comparaison entre la méthode d'agrégation complète et l'énumération d'échantillon<br>aléatoire, sur l'évolution des différentes parts modales : ..... | 163 |
| Graphique n°4.10 : parts modales de la voiture en fonction du temps voiture, par motif Méthode de<br>segmentation du marché à partir du modèle logit conditionnel.....  | 165 |
| Graphique n°4.11 : parts modales du train en fonction du temps voiture, par motif Méthode de<br>segmentation du marché à partir du modèle logit conditionnel.....       | 165 |
| Graphique n°4.12 : parts modales de l'avion en fonction du temps voiture, par motif Méthode de<br>segmentation du marché à partir du modèle logit conditionnel.....     | 166 |
| Graphique n°5.1 : évolution de la valeur du temps en fonction du revenu.....                                                                                            | 180 |
| Graphique n°5.2 : Evolution de la valeur du temps en fonction de la durée de déplacement .....                                                                          | 184 |
| Graphique n°5.3 : Evolution de la valeur du temps en fonction du revenu.....                                                                                            | 184 |
| Graphique n°5.4 : Evolution de la valeur du temps en fonction du coût du déplacement.....                                                                               | 185 |
| Graphique n°5.5 : effets des variables d'offre sur les probabilités marginales .....                                                                                    | 203 |
| Graphique n°5.6 : effets des variables d'offre sur les probabilités marginales pour le motif privé ...                                                                  | 205 |
| Graphique n°5.7 : effets des variables d'offre sur les probabilités marginales selon le motif<br>professionnel.....                                                     | 206 |

# LISTE DES TABLEAUX

|                                                                                                                                          |     |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Tableau n°3.1: Répartition modale aux différentes étapes de sélection de l'échantillon .....                                             | 101 |
| Tableau n°3.2 : Caractéristiques démographiques de l'échantillon.....                                                                    | 102 |
| Tableau n°3.3 : Type de cartes et type de réseaux utilisés par l'individu.....                                                           | 103 |
| Tableau n°3.4 : parts modales .....                                                                                                      | 104 |
| Tableau n°3.5 : le chaînage modal.....                                                                                                   | 105 |
| Tableau n°3.6 : répartition des déplacements par mode selon le sexe et l'âge du voyageur .....                                           | 106 |
| Tableau n°3.7 : répartition des déplacements par mode selon le motif et la taille du groupe .....                                        | 106 |
| Tableau n°3.8 : répartition modale selon la date du déplacement. ....                                                                    | 107 |
| Tableau n°3.9 : répartition modale selon la classe de distance.....                                                                      | 108 |
| Tableau n°3.10 : statistiques descriptives des déplacements et des caractéristiques des voyageurs les effectuant selon les axes TGV..... | 109 |
| Tableau n°3.11 : construction d'une nouvelle variables pour les tranches de revenu. ....                                                 | 111 |
| Tableau n°3.12°: approximation du revenu total.....                                                                                      | 111 |
| Tableau n°3.13: Simulations sur l'axe Lille-Paris.....                                                                                   | 117 |
| Tableau n°3.14 : Résultats d'estimation du temps d'accès en fonction du département.....                                                 | 119 |
| Tableau n°3.15 : Les paramètres de calcul par plage de distance tarifaire sont les suivants.....                                         | 122 |
| Tableau n°4.1 : Résultats d'estimation du modèle Logit. ....                                                                             | 130 |
| Tableau n°4.2 : Tables de succès des modèles logit.....                                                                                  | 130 |
| Tableau n°4.3 : Résultats d'estimation du modèle à coefficients aléatoires. ....                                                         | 132 |
| Tableau n°4.4 : Table de succès du modèle à coefficients aléatoires .....                                                                | 133 |
| Tableau n°4.5 : résultats d'estimations des spécifications non-linéaires. ....                                                           | 136 |
| Tableau n°4.6 : résultats d'estimations du modèle avec temps au carré. ....                                                              | 137 |
| Tableau n°4.7 : Table de succès du modèle avec temps au carré .....                                                                      | 137 |
| Tableau n°4.8 : Résultats d'estimation du modèle multinomial logit simple (/voiture).....                                                | 140 |
| Tableau n°4.9 : Tables de succès du modèle logit simple .....                                                                            | 141 |
| Tableau n°4.10 : résultats d'estimation d'un modèle logit conditionnel .....                                                             | 144 |
| Tableau n°4.11 : Tables de succès du modèle logit conditionnel.....                                                                      | 145 |
| Tableau n°4.12 : résultats d'estimation du modèle logit emboîté .....                                                                    | 147 |
| Tableau n°4.13 : Table de succès du modèle logit emboîté .....                                                                           | 148 |
| Tableau n°4.14 : résultats d'estimation du modèle logit conditionnel pour chaque axe .....                                               | 150 |
| Tableau n°4.15 : Tables de succès du modèle logit conditionnel pour chaque axes .....                                                    | 151 |
| Tableau n°4.16 : Résultats d'estimation du modèle logit emboîté par motifs.....                                                          | 153 |
| Tableau n°4.17 : Tables de succès du modèle logit pour chaque motif .....                                                                | 154 |
| Tableau n°5.1 : valeur du temps en F/heure/voyageur .....                                                                                | 169 |

|                                                                                                                                                          |     |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Tableau n°5.2 : fonction d'utilité indirecte de type Becker.....                                                                                         | 171 |
| Tableau n°5.3 : Estimation du modèle de De Serpa .....                                                                                                   | 172 |
| Tableau n°5.4 : estimation du modèle de De Serpa avec un effet du coût de transport spécifique à<br>chaque mode.....                                     | 173 |
| Tableau n°5.5 : Estimation du modèle de Truong et Hensher .....                                                                                          | 174 |
| Tableau n°5.6 : Valeur du temps tous modes confondus en Fr/h .....                                                                                       | 175 |
| Tableau n°5.7 : Relâchement des contraintes sur les variables coût et temps de transport .....                                                           | 176 |
| Tableau n°5.8 : modèle logit conditionnel avec la variable temps au carré .....                                                                          | 177 |
| Tableau n°5.9 : Evaluation de la valeur du temps en fonction de la durée du trajet et selon le mode de<br>transport. ....                                | 177 |
| Tableau n°5.10 : estimation du modèle de Jara-Diaz et Videla selon les tranches de revenus .....                                                         | 179 |
| Tableau n°5.11 : Estimation du modèle de Causse. ....                                                                                                    | 181 |
| Tableau n°5.12 : évaluation de la valeur du temps proposée par Causse .....                                                                              | 182 |
| Tableau n°5.13 : Modèle de Causse généralisé aux différents modes de transport.....                                                                      | 182 |
| Tableau n°5.14 : Estimation d'un modèle intégrant le temps au carré et un effet croisé entre le temps<br>de transport et les tranches de revenu.....     | 187 |
| Tableau n°5.15 : Evaluation de la valeur du temps selon le mode, le temps et le revenu .....                                                             | 188 |
| Tableau n°5.16 : comparaison des valeurs du temps (F/heure) selon les modèles étudiés.....                                                               | 189 |
| Tableau n°5.17 : estimation du modèle complet .....                                                                                                      | 191 |
| Tableau n°5.18 : Valeur du temps du modèle complet selon le mode de transport, la durée du trajet et<br>le revenu. ....                                  | 192 |
| Tableau n°5.19 : comparaison des valeurs du temps (F/heure) selon les modèles étudiés.....                                                               | 193 |
| Tableau n°5.20 : estimation selon le motif du déplacement.....                                                                                           | 195 |
| Tableau n°5.21 : valeur du temps pour le motif privé .....                                                                                               | 196 |
| Tableau n°5.22 : valeur du temps pour le motif professionnel.....                                                                                        | 196 |
| Tableau n°5.23 : valeur du temps évaluée au point moyen .....                                                                                            | 197 |
| Tableau n°5.24 : valeur du temps dans le modèle de Hensher avec effet durée du trajet.....                                                               | 197 |
| Tableau n°5.25 : effets marginaux des variables d'offre sur l'utilité. ....                                                                              | 199 |
| Tableau n°5.26 : effets des variables de demande sur l'utilité marginale. ....                                                                           | 201 |
| Tableau n°5.27 : effets des variables de demande dichotomiques sur la probabilité relative du choix<br>d'un mode de transport par rapport à l'autre..... | 202 |
| Tableau n°5.28 : élasticités directes sur les variables d'offre.....                                                                                     | 207 |
| Tableau n°5.29 : élasticités directes sur les variables d'offre selon le motif de déplacement.....                                                       | 208 |

# ANNEXES

## Annexe n° 1 : Le modèle de MATISSE<sup>26</sup>

Cette présentation est tirée de la thèse de Causse.

L'objectif de ce dernier modèle réalisé par l'INRETS est d'étudier différentes variantes des réseaux de transport à longue distance en Europe, dans une optique de long terme. Dans ce but, le sous modèle FRIEDRICH (Fonction de Reconstitution de l'Induction et d'Estimation des Détournements selon une Règle d'Individualisation des Choix) est chargé de prévoir les effets des modifications de l'offre sur le trafic international de chaque mode de transport.

Face au manque de données qui rendait très difficile un calibrage ex nihilo de ce sous-modèle, la mise au point de ses fonctions essentielles a dû se faire sur un type de trafic à longue distance alternatif ayant donné lieu à suffisamment d'observations. L'option retenue concerne le trafic domestique français à plus de 100 km et implique de facto l'estimation de valeurs du temps sur le territoire national.

Formellement, le lien entre offre et trafic dans FRIEDRICH se fait à l'échelle de chaque relation OD prédéfinie, conformément aux prescriptions suivantes. Le modèle doit :

- S'appliquer aux moyens de transport conventionnels ou nouveaux
- Prendre en compte l'offre de chaque moyen de transport sous la forme d'un grand nombre de « modes abstraits »<sup>27</sup>, correspondant chacun à une façon précise d'utiliser le moyen de transport : selon différentes heures de départ et différents itinéraires avec ou sans péage pour la voiture, selon les horaires et les tarifs des différents services existant pour les transports collectifs ;

---

<sup>26</sup> La présentation qui suit reprend des pans entiers de deux documents techniques de l'INRETS (1997)

<sup>27</sup> Habituellement, les expressions de moyen de transport et de mode sont interchangeables. Ce n'est pas le cas ici. Cette différence motive notre préférence lexicale pour l'expression « mode abstrait ». Dans la suite, le terme mode entre guillemets renvoie à cette seconde acceptation.

- Assurer le partage du trafic entre tous les « modes » de transport dans le champ des situations d'offre plurimodale envisageables, en tenant compte des caractéristiques des voyageurs comme par exemple, le droit à réduction tarifaire ;
- Reproduire les phénomènes d'induction de trafic pour tous les moyens de transport confondus, en cohérence totale avec la variation concomitante du partage modal quand on passe d'une situation d'offre à une autre.

La solution méthodologique retenue est celle de la désagrégation par catégorie de trajet<sup>28</sup>. Celles-ci sont qualifiées de « segments »<sup>29</sup> par les concepteurs du modèle. Les motifs personnel et professionnel sont ensuite distingués et correspondent chacun à un sous-modèle. Fondamentalement, seul le niveau des paramètres utilisés distingue ces deux modèles qui obéissent par ailleurs au même fonctionnement. Celui-ci peut être schématisé par les étapes suivantes :

- Désagrégation de chaque OD en 15 000 segments. Chacun de ces segments correspond à une catégories de trajets jugés semblables au vu d'un certain nombre de critères en fonction des quels les usagers qui le composent apprécient le niveau de service d'un « mode ». Concrètement à tout segment  $n$  est associé en plus d'une valeur du temps,  $V_n$  (qui peut prendre 10 modalités différentes selon le segment), une collection de paramètres listée dans le tableau n° 6.
- Génération par le modèle de la loi de distribution selon les 15 000 segments des trajets qui existeraient sur l'OD si celle-ci était desservie par un ensemble donné de « modes » de transport, qualifié d'offre standard. Le choix de l'offre standard est arbitraire mais fait partie intégrante du modèle ; il ne peut être modifié sans revoir complètement les valeurs données aux autres paramètres ;
- Détermination pour chaque segment du « mode » de transport choisi pour les trajets qui le composent dans la situation d'offre réelle d'une part, et dans la situation d'offre standard d'autre part. Ce choix est fondé sur la minimisation d'un coût généralisé de déplacement entre

---

<sup>28</sup> MATISSE distingue un voyage d'un trajet. Un voyage désigne l'ensemble de ce que fait un individu au cours d'une même absence de son domicile (en déplacements et en séjours) ; un trajet désigne chaque déplacement entre le domicile et les lieux de séjour eux-mêmes. Un voyage comporte donc le plus souvent un trajet aller et un trajet retour.

les OD étudiées. Le coût généralisé dépend de caractéristiques de niveau de service du « mode » considéré et des critères d'appréciation propres au segment. Le tableau n° 6 rend compte de sa constitution.

- Estimation du nombre de trajets existants dans chaque segment pour la situation d'offre réelle. Il s'obtient à partir du nombre des trajets existants en offre standard par application à la fois d'une élasticité directe au coût généralisé ressenti par les voyageurs du segment sur le mode qu'ils ont choisi, et des élasticités croisées par rapport aux coûts généralisés ressentis par les voyageurs des autres segments sur les modes choisis par eux ;
- Enfin, les résultats modaux globaux sont obtenus par simple agrégation des segments.

Les valeurs du temps utilisées dans le modèle MATISSE sont reproduites dans le tableau n° 5<sup>30</sup>.

**Tableau n° 5 : Valeurs du temps retenus dans le modèle MATISSE (en Euro 88/MN)**

| Pour des motifs personnels | Pour des motifs professionnels |
|----------------------------|--------------------------------|
| V1=0.0328                  | V1=0.0848                      |
| V2=0.0603                  | V2=0.1560                      |
| V3=0.0867                  | V3=0.2241                      |
| V4=0.1157                  | V4=0.2992                      |
| V5=0.1500                  | V5=0.3879                      |
| V6=0.1929                  | V6=0.4988                      |
| V7=0.2501                  | V7=0.6466                      |
| V8=0.3340                  | V8=0.8635                      |
| V9=0.4796                  | V9=1.2400                      |
| V10=0.8823                 | V10=2.2813                     |

Source : « Modèle MATISSE, Description détaillée de la version du 14/05/9 » INRETS, document technique juin 1997

<sup>29</sup> Ce dénominateur est choisi par analogie à l'analyse de données. Dans cette discipline, les sous ensembles d'observations qui ont en commun certaines caractéristiques et assurent une partition complète de l'ensemble des observations, sont qualifiés de segments.

<sup>30</sup> Au niveau du détail le plus fin, MATISSE produit également des distributions de voyageurs selon leurs valeurs du temps.

TABLEAU N°6 : CONSTRUCTION DETAILLEE DU COUT GENERALISE DANS LE MODELE MATISSE

| caractéristiques du segment <i>n</i>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | caractéristiques du "mode" <i>i</i>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p> <math>V_n</math> = valeur du temps<br/> <math>S_n</math> = moment souhaité pour le trajet dans la journée<br/> <math>F_n</math> = fréquence annuelle de voyage pour l'individu et le type de trajet considéré<br/> <math>D_n</math> = durée de voyage dont fait partie le trajet<br/> <math>G_n</math> = nombre de personnes accompagnant<br/> <math>U_n</math> = degré d'attrance de la voiture particulière<br/> <math>M_n</math> = degré de disponibilité de la voiture<br/> <math>B(k(i))</math> = coefficient déterminant les temps de parcours terminaux (début et fin)<br/> <math>R_n</math> = coefficient de droit à réduction tarifaire sur les transports collectifs<br/> <math>I_n</math> = valeur de l'inconfort en seconde classe sur les trains de jour<br/> <math>I''_n</math> = valeur de l'inconfort en seconde classe sur les trains de nuit<br/> <math>I'_n</math> = valeur de l'inconfort en voiture de nuit ou sur route ordinaire<br/> <math>S'_n</math> = moment souhaité de jour, quand <math>S_n</math> de nuit<br/> <math>E(k(i), i)</math> = autres facteurs de dispersion<br/> <math>N_n</math> = coefficient de rapidité de modification des habitudes<br/> <math>IA_n</math> = facteur d'attitude vis à vis de l'avion<br/> <math>DI_n</math> = coefficient de type de carburant </p> | <p> <math>k(i)</math> = moyen de transport principal<br/> <math>P</math> = prix payé pour le trajet<br/> <math>T</math> = temps de parcours principal<br/> <math>A</math> = temps de parcours terminal<br/> <math>H</math> = écart entre le moment souhaité et le milieu de trajet<br/> <math>H'</math> = heures indues du début et de fin de trajet<br/> <math>J</math> = nombre de correspondances<br/> <math>X</math> = inconfort de 2<sup>ème</sup> classe<br/> <math>X'</math> = inconfort de jour sur route ordinaire<br/> <math>X''</math> = inconfort de nuit sur route ou autoroute<br/> <math>Y</math> = coût de disponibilité d'une VP pour le trajet<br/> <math>Z</math> = pénalité de non utilisation de la VP pour le trajet </p> |
| <p>coût généralisé</p> $C(i, n) = (1.05 - 0.1 * E_n((k(i), i)) * IA_n$ $* \left\{ \begin{aligned} &+ V_n * [T(i, V_n, B_n(3)) + A(i, B_n(3), B_n(k(i))) + H(i, S_n, S'_n, B_n(3), B_n(k(i)))] \\ &+ V_n * H'(i, B_n(3), B_n(k(i))) + 90 * V_n * J(i) \\ &+ I_n * X(i, B_n(3)) \text{ ou } I''_n * X(i, B_n(3)) \text{ ou } I'_n * (X'(i, V_n) / G_n + X''(i, V_n, B_n(3), B_n(4))) \end{aligned} \right\}$ $+ Y(k(i), G_n, M_n) + Z(k(i), D_n, U_n)$                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |

*B(1), B(2), B(3) et B(4) représentent respectivement les temps de parcours terminaux pour le fer, l'air, la voiture particulière sans et avec péage autoroutier. Leurs valeurs pour chaque segment n sont choisies aléatoirement parmi un ensemble de 15000 valeurs discrètes réparties uniformément entre 0 et 1.*

Une réagréation en moyens de transport traditionnels permet d'établir le tableau complémentaire n° 7, plus directement comparable aux autres modèles français :

**Tableau n° 7 : Valeurs du temps « moyennes pour l'année 1988  
(en Francs 88/heure/voyageur)**

| <div>Mode</div> <div>Motif</div> | Voiture<br>particulière | Train<br>(2 <sup>ième</sup> classe) | Train<br>(1 <sup>ière</sup> classe) | Avion |
|----------------------------------|-------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|-------|
| Personnel                        | 49 F                    | 42 F                                | 93 F                                | 188 F |
| Professionnel                    | 183 F                   | 167 F                               | 247 F                               | 403 F |
| Tous motifs confondus            | 63 F                    | 56 F                                | 158 F                               | 276 F |

Source : « Transports 2010 » (1992)

Au sens strict, la valeur du temps est définie par les concepteurs de MATISSE « comme la dépense monétaire supplémentaire que le voyageur est prêt à consentir pour gagner marginalement du temps lors du trajet effectué, en supposant que toutes les autres caractéristiques de ce sujet restent inchangées ». Dans les faits néanmoins les valeurs effectivement retenues conditionnent la façon dont le voyageur valorise d'autres aspects du niveau de service que le pur temps de trajet. Ainsi, par construction, les valeurs de  $M_n$ ,  $I_n$  et  $I'_n$  sont positivement corrélées avec  $V_n$  quand  $R_n$  l'est négativement.

D'une manière générale, dans les divers rapports techniques concernant ce modèle, on peut déplorer l'absence d'une description précise des formes empiriques à partir desquelles les valeurs du temps sont inférées<sup>31</sup>. Ce « silence » est justifié par le fait que « les formes des fonctions et valeurs des paramètres sont fixées une fois pour toutes, du moins tant qu'il n'aura pas été mis au point de nouvelle version de MATISSE. Il n'y a donc pas grand intérêt à faire la chronique de la façon dont elles ont été estimées par les concepteurs du modèle. « Cette sentence s'accorde difficilement avec la déclaration selon laquelle une des épreuves

<sup>31</sup> Les concepteurs du modèle se contentent de préciser que ces valeurs sont « révélées à partir du comportement observé de catégories de voyageurs dans différents contextes de choix : le choix de se déplacer ou non, le choix du moyen de transport, le choix de la classe tarifaire pour le train ou l'avion ou le choix de l'itinéraire notamment pour la route ».



déterminantes dans le test du modèle reste » celle du jugement critique que chacun peut avoir sur la représentation des phénomènes économiques qui sous-tend les équations mathématiques du modèle. En effet, plus que l'accord avec des données limitées au champ des phénomènes qui ont déjà pu être observés sur le terrain, c'est à notre sens la qualité de la transformation des mécanismes de comportement des individus qui conditionne l'aptitude d'un modèle à se projeter hors du champ déjà exploré ». A ce sujet, notre position théorique est claire : l'inférence sur les VTTS doit être menée à partir d'un modèle empirique dérivé d'un programme d'optimisation micro-économique temporel. En anticipant sur les résultats à venir, on peut déjà préciser que cette inscription permet, par exemple, de répondre à la question de la corrélation pressentie (mais laissée en suspens dans MATISSE) entre durée du trajet et VTTS. A l'évidence, cette façon de procéder ne peut que renforcer la crédibilité des versions futures d'un modèle, indubitablement progressiste par rapport aux autres modèles français.

## Annexe n° 2 : L'enquête Transports et Communications 1993-1994

Sous un titre un peu différent, l'enquête Transports et Communications de 1993-94 s'inscrit dans la lignée des enquêtes Transports déjà réalisées en 1966-67, 1973-74 et 1981-82. Elle en reprend d'ailleurs les définitions et les principes afin d'assurer la mesure des évolutions structurelles. Cette enquête a donc pour objet principal de décrire tous les déplacements, quels qu'en soient le motif, le mode de transport, la longueur, la période de l'année ou le moment de la journée. Elle s'intéresse aussi, pour comprendre ces comportements, aux possibilités d'accès aux transports collectifs et aux moyens de transports individuels dont disposent les ménages.

*Par ailleurs, précisent Jean-Loup MADRE (INRETS – Institut National de Recherche et d'Études sur les Transports et leur Sécurité) et Joëlle MAFFRE (INSEE), l'aspect « communications » est traité dans l'enquête aussi bien en termes de contacts réalisés par les ménages en situation de mobilité qu'en termes d'équipements en moyens de télécommunications.*

Un des points forts de cette enquête comme des autres de ce type est de concerner tous les modes de transport et de fournir ainsi une vision d'ensemble cohérente des habitudes et pratiques.

Cependant le dispositif comporte des aspects fortement « routiers », avec par exemple un carnet « voiture » et un descriptif fouillé du parc de véhicules du ménage. Pour expliquer ceci, on peut évoquer l'importance de ce moyen de transport utilisé dans plus de 80 % des déplacements de voyageurs, et donc la nécessité de renseignements fins et précis pour les analyser. C'est aussi parce que c'est sur ce plan que l'absence de statistiques se fait sentir auprès des acteurs du domaine ; en effet, contrairement au secteur ferroviaire, il n'existe pas d'entreprise exploitante unique tenant à jour ces statistiques. De la même manière, on peut s'interroger sur l'importance du recueil concernant les voyages à longue distance (plus de 100 km) dont on a fixé la période d'observation à six mois. Ce dispositif, justifié par la rareté relative de ces longs déplacements, doit répondre aux nombreuses questions sur les trafics inter-régionaux et internationaux dont les enjeux sont particulièrement importants en matière d'investissements (autoroutes, TGV, transports aériens).

## Le parc de véhicules

L'enquête donnera une bonne idée de l'ensemble des véhicules dont disposent les ménages puisqu'elle les recense tous : **des véhicules utilitaires légers** (moins de 3,5 tonnes) **aux deux-roues non immatriculés** (y compris les bicyclettes). Ce dénombrement sera complété d'une appréciation sur les motifs d'utilisation de chacun. Mais, c'est **pour les automobiles et pour les motos que l'analyse sera la plus fouillée**. Le champ des automobiles est celui des petits véhicules utilitaires, des voitures particulières ou commerciales, des voitures<sup>32</sup> dont disposent les ménages, que ces véhicules leur appartiennent ou qu'ils soient à leur disposition, à condition dans ce dernier cas, qu'ils puissent les utiliser de façon permanente (au minimum trois mois) et libre. Pour chacun des véhicules, on connaîtra les caractéristiques techniques, l'état à l'acquisition, les conditions de cette acquisition, le kilométrage annuel et par motif d'utilisation, les conducteurs, la consommation de carburant. La tenue pendant une semaine d'un carnet « voiture », attaché à une des automobiles du ménage, viendra compléter ces informations et éclairera les conditions d'usage : fréquence des déplacements, distances parcourues, taux d'occupation du véhicule, motif du déplacement. L'enquête permettra ainsi d'étudier le multi-équipement et la spécialisation des véhicules selon leur âge, leur rang dans le parc.

En dehors des parties du questionnaire spécifiquement consacrées aux véhicules, l'analyse de l'utilisation des véhicules individuels bénéficiera aussi du recueil des conditions dans lesquelles s'effectuent les déplacements des personnes. En effet, dès qu'un déplacement se fait à bord d'un véhicule individuel, on interroge sur la nature de ce véhicule (véhicule possédé, emprunté ou loué, et s'il est possédé, repérage dans le parc du ménage), le nombre de personnes à bord, le type de réseau utilisé : autoroute, réseau urbain s'il s'agit de déplacements de courte distance, ou autre réseau.

L'enquête fournira aussi les renseignements nécessaires à une analyse de l'évolution de la motorisation en recueillant la liste des véhicules immatriculés détenus depuis le 01.01.1990, c'est à dire pendant une période qui varie, selon la date de l'interrogation, de 3 à 4 ans. Pour tous ces véhicules, la description est évidemment simplifiée et l'accent mis sur la destination

---

<sup>32</sup> Véhicule pour lequel un permis de conduire « AT » n'est obligatoire que s'il fait plus de 50 cm<sup>3</sup> de cylindrée.

du véhicule lors de l'abandon : vente, casse, vol, ... Par ailleurs, on essaie de savoir pour les ménages qui ne possèdent actuellement aucun véhicule mais qui ont été motorisés dans le passé, de quand date leur « démotorisation », s'ils l'estiment définitive et quelles en sont les raisons.

### **Les déplacements des personnes**

Les déplacements de personnes sont recensés à travers trois volets : déplacements d'**un jour de semaine**, des deux jours du **week-end** et déplacements de **longue distance**, c'est à dire ayant eu lieu au cours de voyages éloignant la personne de plus de 100 km (assimilés à 80 km à vol d'oiseau) de son domicile. Chaque déplacement est alors décrit au moins par les caractéristiques suivantes : heures de départ et d'arrivée, lieux d'origine et de destination, motif, modes de transport, distance. Dans tous les cas, s'il y a usage d'un véhicule individuel, ce véhicule est repéré, et son taux d'occupation, les réseaux routiers utilisés sont relevés. S'il y a utilisation de modes de transports collectifs, le relevé porte sur les titres de transport.

Les déplacements quotidiens du domicile au lieu de travail, d'études ou de garde sont étudiés par ailleurs pour chacun des membres du ménage. Interrogés sur la manière habituelle de faire ce trajet, ils renseignent sur la distance, la durée et la combinaison de modes de transports utilisée. Ce dispositif couvre la grande majorité des déplacements. Cependant échappent à l'enquête les déplacements peu fréquents donc mal saisis par une interrogation « jour de semaine » ou « week-end » et qui se faisant vers des lieux distants de moins de 100 km du domicile, ne relèvent pas de l'interrogation « longue distance ». pour pallier cette faible représentation, l'enquête a prévu une partie propre à capter la fréquentation de l'espace régional au moins en termes d'habitudes. c'est l'une des fonctions du chapitre intitulé « **opportunités de contacts** » qui répertorie les localités habituellement visitées, ou contactées par téléphone, pour motifs privés (famille, résidence secondaire, ou autres, ...), ou motifs professionnels. L'autre fonction de cette interrogation est de comprendre l'articulation entre les comportements de déplacements et de télécommunications.

## Autres sujets d'étude

En fournissant les conditions d'usage des véhicules et en particulier l'autonomie kilométrique quotidienne nécessaire, les temps de stationnement, les lieux de stationnement, les résultats de cette enquête alimenteront la réflexion sur la taille techniquement possible du **marché du véhicule électrique**. Mais il s'agira bien ici d'approche technique puisque l'enquête n'intègre aucune des dimensions qualitatives du choix.

Le relevé du kilométrage réalisé sur les différents réseaux routiers servira de base aux études sur la mesure de **l'exposition au risque d'accident de la route** pour des groupes de population.

Signalons aussi que cette enquête sera utilisée pour des études sur la **concurrence des modes de transports**, leur spécialisation en fonction des motifs, la combinaison des modes pour effectuer un même déplacement, en particulier la manière dont s'effectuent les parcours terminaux (partie du trajet effectuée entre le domicile et un réseau de transport collectif). Il devrait également résulter de cette enquête une meilleure connaissance des déplacements régionaux dans l'aire d'attraction des grandes villes, des **effets de la mobilité** et des formes qu'elle prend sur les consommations d'énergie et les problèmes de l'environnement, des déplacements touristiques.

Enfin, on a cherché à connaître les **besoins de communication** en situation de mobilité et à recenser les **moyens personnels de communication** (téléphone, minitel, ...) dont disposent les ménages. Cette enquête offre ainsi un éclairage sur l'ensemble des moyens de communications, y compris téléphoniques. L'ouverture à ce champ connexe des transports justifie le nom actuel de cette enquête et constitue un nouveau pan d'études.

### **Carnet « voiture », questionnaire « voyages », ...**

Comme d'habitude, le logement à enquêter devra être une résidence principale. Les autres types de logements (vacant, secondaire, ou occasionnel) seront exclus du champ de l'enquête. Le ménage, habitant ce logement, sera interrogé par l'enquêteur au cours de deux visites. Il devra aussi remplir, dans l'intervalle de ces deux visites, un *carnet « voiture »* et un dossier de *fiches descriptives des véhicules* dont il dispose ou dont il a disposé depuis le 1<sup>er</sup> janvier 1990.

Dans la mesure où le carnet « voiture » doit être tenu par le (s) conducteur (s) de la voiture pendant 7 jours, les deux visites seront distantes d'au moins 8 jours. Enfin, l'enquêteur laissera au ménage un *questionnaire* « voyage » que celui-ci aura à tenir pendant les 3 mois qui suivent le passage de l'enquêteur et qui viendra compléter la description des déplacements de longue distance des trois derniers mois, obtenue par interview au cours de la deuxième visite de l'enquêteur. On décrira ainsi ces déplacements pendant 6 mois. Le questionnaire « voyages » sera expédié par l'enquêteur au CNE (Centre National d'Exploitation) – INSEE – de Toulouse. Le carnet « voiture » et les fiches descriptives des véhicules remplis par le ménage sont ramassés par l'enquêteur lors de sa deuxième visite.

Au cours de ces deux visites, l'enquêteur abordera, en plus naturellement des questions de cadrage (description de la composition du ménage, occupation et profession de chacun de ses membres, ...), les thèmes suivants :

- Déplacements habituels domicile-travail, domicile-lieu d'étude ou de garde des enfants ;
- Permis de conduire et pratique de la conduite, accidents de la circulation ;
- Abonnement et réductions dans les transports collectifs ;
- Description des véhicules dont dispose le ménage et historique du parc du ménage ;
- Pour une personne tirée au sort, description des déplacements de la veille et du dernier week-end ;
- Pour une seconde personne tirée au sort (éventuellement la même), occasion de contact, par téléphone ou en se déplaçant, et la description des déplacements à plus de 100 km. Ce dernier relevé, effectué à *posteriori*, fera appel à la mémoire de l'enquêteur. Pour faciliter cette démarche et assurer un maximum de qualité aux informations recueillies, ce relevé a été prévu au cours de la deuxième visite alors que la personne aura déjà été prévenue par l'enquêteur, 8 jours auparavant, de l'objet de l'interrogation à laquelle elle devra répondre et de la nécessité de s'y préparer en établissant la liste de ses voyages sur un aide-mémoire ;
- L'équipement en moyens de communication du logement et l'environnement du logement (proximité des gares, arrêts d'autobus, commerce, équipements collectifs, ...)

L'enquête prévoit explicitement le cas des personnes les plus mobiles (c'est à dire ayant réalisé au cours des trois derniers mois plus de six déplacements de longue distance), afin

d'alléger l'effort qui leur est demandé. On espère ainsi limiter les refus liés à la lourdeur de l'interview qui provoque les biais de sélection. Pour ces personnes, l'enquête restreint à un mois la période d'observation par interview des déplacements à longue distance.

### **Une innovation importante de l'enquête**

On a également, et dans tous les cas, réduit la tâche des enquêteurs en proposant des codages simplifiés pour les déplacements identiques, les trajets de retour et les tournées.

Une innovation importante de l'enquête, utile notamment pour les applications en matière de sécurité routière, consiste à **relever le type de route utilisée en voiture** (voirie urbaine, autoroute, ...), tant pour les déplacements de la veille et du dernier week-end que pour les voyages à longue distance (seulement au cours du dernier mois). Les informations spatiales sur les déplacements sont systématiquement caractérisées par des noms de lieux (si possible de communes) inscrits en clair. Au stade du traitement informatique, ces noms seront convertis en numéros de communes à l'aide des algorithmes élaborés par le CNI (Centre National Informatique) – INSEE – de Lille ; les localités des pays voisins (Union Européenne et Suisse) seront également codées.

L'essentiel des données concernant les véhicules comme les caractéristiques techniques, les conditions d'achat, d'usage, le kilométrage annuel ou par grandes catégories de motifs de déplacement sont demandés sur les fiches descriptives que les conducteurs de ces véhicules rempliront entre les deux passages de l'enquêteur. c'est pendant cette même période qu'ils tiendront le carnet sur les déplacements d'un de leurs véhicules aléatoirement désigné.

### **Une vingtaine de partenaires**

Un échantillon de 20 000 logements a été tiré (nettement plus qu'en 1981-82 où le nombre d'adresses était de 11 000) et réparti sur 8 vagues étalées sur une année complète (de mai 1993 à avril 1994) afin de neutraliser la forte saisonnalité qui marque la mobilité, au moins pour les motifs privés.

L'objectif de l'enquête étant d'analyser les déplacements des ménages, on a sur-représenté ceux qui ont plusieurs voitures et dont on sait qu'ils sont les plus mobiles (sauf à Paris où la

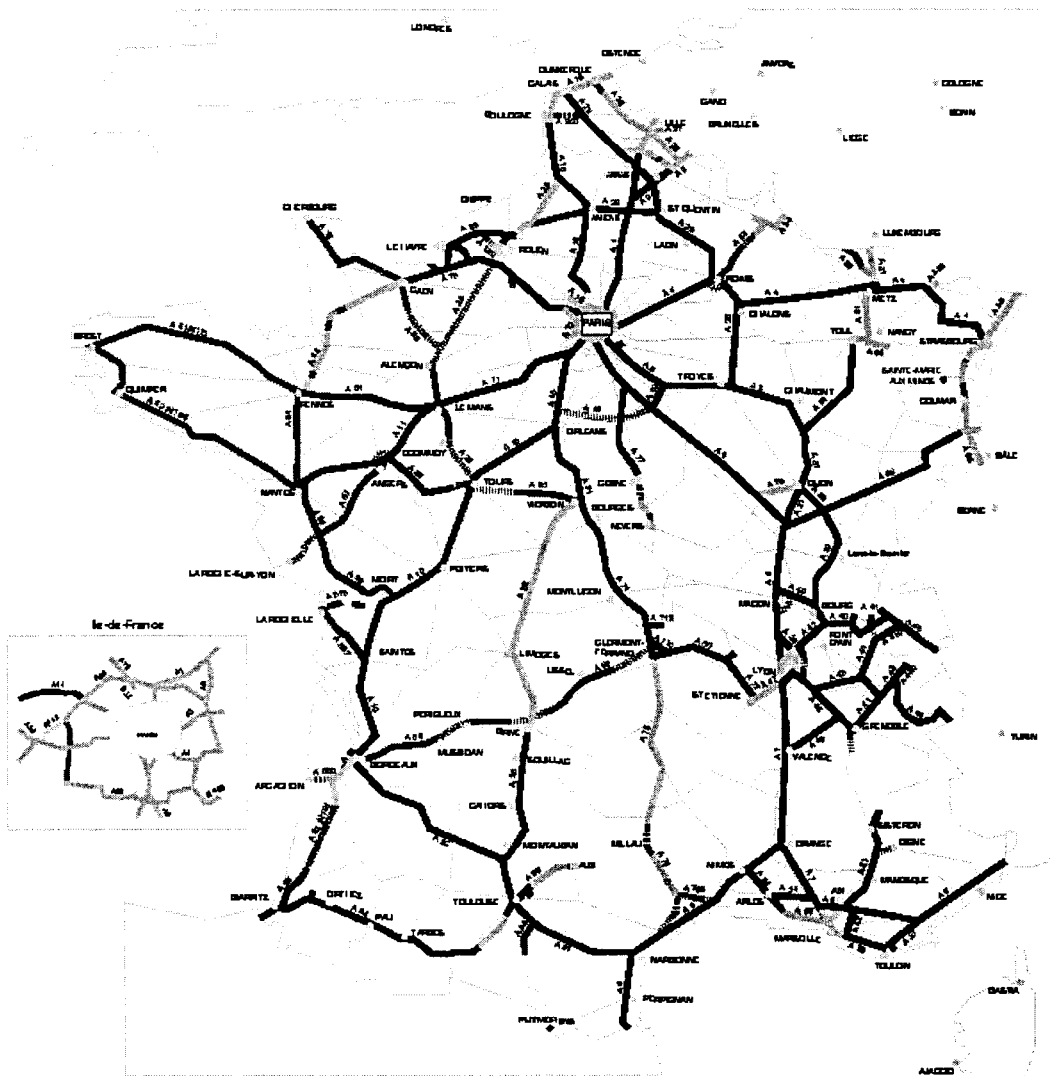
forte densité constitue un frein à la motorisation). De plus, la probabilité de tirage de la personne qui répond sur ses déplacements à longue distance est doublée pour la plus mobile du ménage. En revanche, compte tenu de l'intérêt pour la voiture électrique, on sous-représente le premier véhicule du ménage dans l'attribution du carnet « voiture ». en effet, ce véhicule, défini comme celui qui sert à tout le ménage, ou en cas d'incertitude à la personne de référence, est celui susceptible d'avoir besoin d'une plus grande autonomie kilométrique journalière.

Parce que cette enquête fournira une base statistique importante et rare, puisqu'elle n'est renouvelée que tous les 10 ans environ ; une vingtaine d'entreprises publiques et privées du domaine, tout comme les institutions de recherche et d'étude spécialisées tels l'INRETS (Institut National de Recherche et d'Études sur les Transports et leur Sécurité) et l'OEST (Observatoire Économique et Statistique des Transports) ont participé à la préparation et à la réalisation de cette opération. Ils avaient pour la plupart été associés à l'INSEE dans l'enquête précédente. Aux partenaires traditionnels de l'enquête se sont ajoutés France-Télécom et EDF. Le premier, à la suite de la prise en compte des besoins en communications des ménages en situation de mobilité, traités dans des parties nouvelles de l'enquête : « occasions de contacts », relevé de l'équipement du ménage en moyens de télécommunication et relevé de l'usage du téléphone au cours des déplacements. Pour le second, en raison des préoccupations actuelles sur le véhicule électrique.





# RÉSEAU AUTOROUTIER au 1<sup>er</sup> Janvier 2001



**Autoroutes en service : 8806 km (\*)**, dont :  
- 7316 km d'autoroutes concédées  
- 1490 km d'autoroutes non concédées  
**Liaisons appelées à devenir des autoroutes : 1080 km**  
**Autoroutes en travaux : 770 km**, dont :  
- 568 km d'autoroutes concédées  
- 204 km d'autoroutes non concédées  
**Autres autoroutes D.U.P. ou faisant l'objet d'un contrat de concession**  
**Autres routes nationales**  
(\*) + 1022 km d'autoroutes urbaines



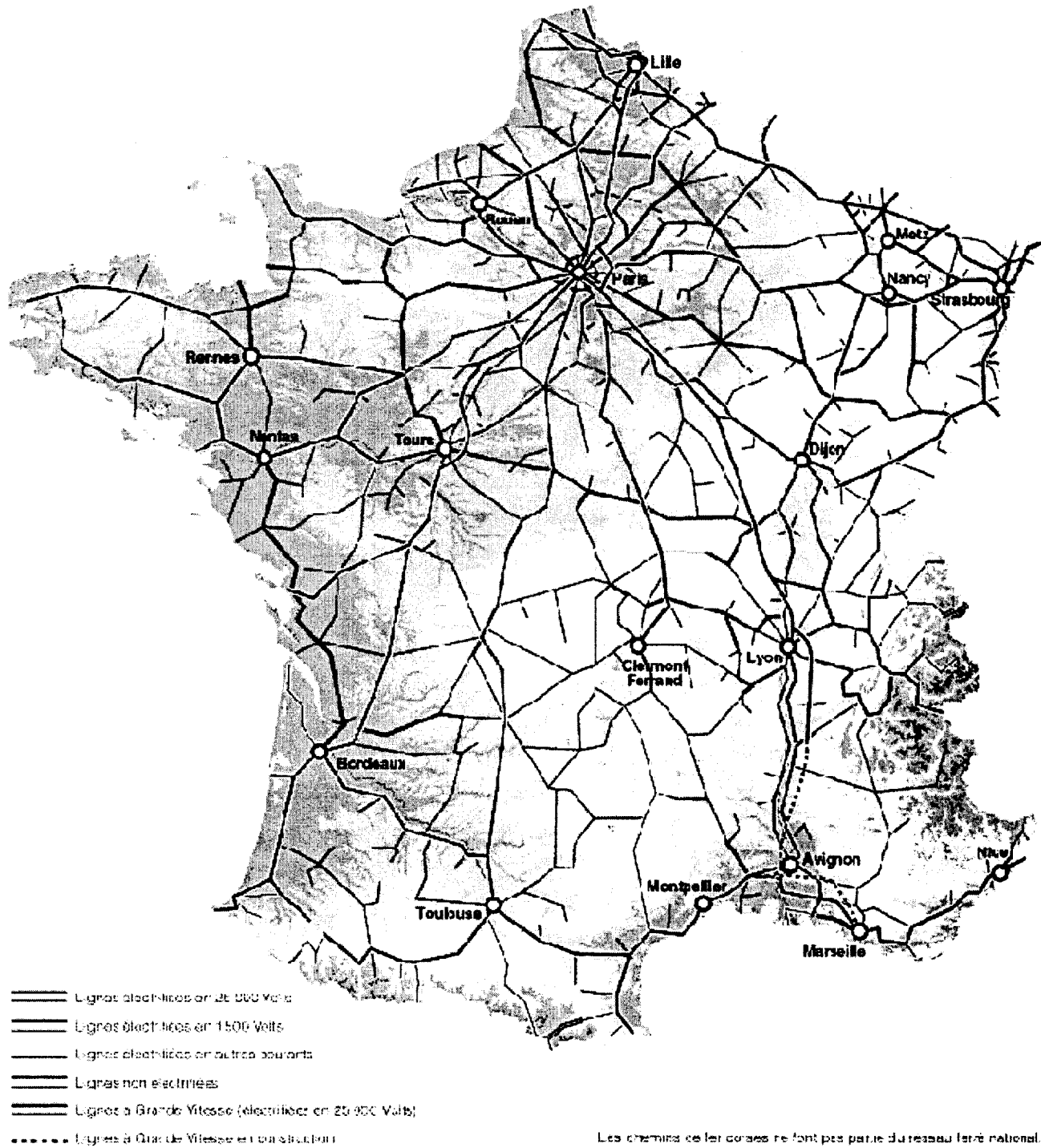
JANVIER 2001

Direction des Routes

Sources : D.R. / B.R.  
Cellule Cartographique 61.40.01.002.44

L'INVENTAIRE DU RÉSEAU

Carte du réseau ferré national en 1999.



Annexe n° 5 : Modèle de Causse

|                                                 | Voiture      |              | Train        |              | Avion        |              |
|-------------------------------------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
|                                                 | Coefficients | t de Student | Coefficients | t de Student | Coefficients | t de Student |
| <b>Caractéristiques de l'offre de transport</b> |              |              |              |              |              |              |
| Coût de transport                               | -0,005       | -10,85       | -0,004       | -6,99        | -0,001       | -4,06        |
| Temps de transport                              | -0,021       | -11,43       | -0,010       | -7,97        | -0,031       | -4,61        |
| Temps de transport au carré                     | 2,8E-05      | 10,58        | 6,5E-06      | 3,94         | 7,8E-05      | 4,39         |
|                                                 | 1,9E-09      | 6,70         | 1,9E-09      | 6,70         | 1,9E-09      | 6,70         |
| RMT                                             | -1,6E-08     | -5,94        | -1,6E-08     | -5,94        | -1,6E-08     | -5,94        |
| <b>Caractéristiques de l'individu</b>           |              |              |              |              |              |              |
| Age                                             | 0,017        | 6,56         | 0,018        | 6,81         |              |              |
| Homme                                           | -0,016       | -0,20        | 0,109        | 1,31         |              |              |
| PCS (Réf. Employé, agriculture)                 |              |              |              |              |              |              |
| Cadre supérieur                                 | -0,098       | -0,96        | -0,452       | -4,50        |              |              |
| Profession intermédiaire                        | 0,303        | 2,90         | 0,182        | 1,77         |              |              |
| Ouvrier                                         | 1,399        | 6,90         | 0,567        | 2,78         |              |              |
| Nombre de voitures                              | 0,054        | 0,93         | -0,336       | -6,12        |              |              |
| distance parcourue en voiture                   | 1,1E-05      | 3,57         | -3,6E-05     | -10,64       |              |              |
| <b>Caractéristiques du déplacement</b>          |              |              |              |              |              |              |
| Taille du groupe (réf. + de deux pers)          |              |              |              |              |              |              |
| Une personne                                    | -1,522       | -12,81       | 0,889        | 6,64         |              |              |
| Deux personnes                                  | -0,809       | -6,94        | 0,727        | 5,42         |              |              |
| Motif du déplacement (réf. Visite)              |              |              |              |              |              |              |
| Professionnel                                   | -1,378       | -11,07       | -0,856       | -7,46        |              |              |
| Vacances                                        | 0,912        | 8,02         | -0,090       | -0,82        |              |              |
| Loisirs                                         | 0,565        | 3,99         | -0,171       | -1,21        |              |              |
| Durée du séjour (réf. Plus de trois jours)      |              |              |              |              |              |              |
| une journée                                     | -0,503       | -3,25        | -0,972       | -6,26        |              |              |
| deux jours                                      | -0,320       | -2,40        | -0,676       | -5,15        |              |              |
| trois jours                                     | -0,543       | -4,56        | -0,593       | -5,30        |              |              |
| Constante                                       | 3,321        | 4,97         | 0,113        | 0,17         |              |              |
| Valeur du temps au point moyen (Fr/h)           | 141          |              | 163          |              | 330          |              |
|                                                 |              |              |              |              |              |              |
| Nombre d'observations                           |              |              | 7607         |              |              |              |
| Log Vraisemblance à zéro                        |              |              | -8357        |              |              |              |
| Log Vraisemblance de Béta                       |              |              | -3681        |              |              |              |

**Annexe n° 6 : tableau des probabilités marginales**

Effet des variables de demande sur les probabilités de choix modal

|                    | Effet probabilité |         |         | Effet probabilité |         |         |
|--------------------|-------------------|---------|---------|-------------------|---------|---------|
|                    | Voiture           | Train   | Avion   | Voiture           | Train   | Avion   |
| Age                | 0,0038            | -0,0028 | -0,0009 | -0,0029           | 0,0031  | -0,0002 |
| Homme              | 0,0100            | -0,0075 | -0,0025 | -0,0141           | 0,0150  | -0,0009 |
| Cadre supérieur    | -0,2754           | 0,2065  | 0,0688  | -0,0813           | 0,0864  | -0,0051 |
| Profession inter   | -0,1657           | 0,1243  | 0,0414  | -0,0580           | 0,0617  | -0,0036 |
| Ouvrier            | -0,0174           | 0,0130  | 0,0043  | 0,0497            | -0,0528 | 0,0031  |
| Nombre de voitures | 0,0557            | -0,0418 | -0,0139 | -0,0296           | 0,0315  | -0,0019 |
| Distance voiture   | 0,1952            | -0,1464 | -0,0488 | -0,0444           | 0,0471  | -0,0028 |
| Une personne       | 0,0147            | -0,0110 | -0,0037 | 0,0415            | -0,0441 | 0,0026  |
| Deux personnes     | 0,0000            | 0,0000  | 0,0000  | 0,0000            | 0,0000  | 0,0000  |
| Professionnel      | -0,2106           | 0,1580  | 0,0527  | 0,0984            | -0,1046 | 0,0062  |
| Vacances           | 0,1663            | -0,1247 | -0,0416 | 0,0047            | -0,0050 | 0,0003  |
| Loisirs            | 0,0791            | -0,0593 | -0,0198 | 0,0276            | -0,0294 | 0,0017  |
| Une journée        | -0,0930           | 0,0697  | 0,0232  | 0,1249            | -0,1327 | 0,0078  |
| Deux jours         | -0,0717           | 0,0538  | 0,0179  | 0,0949            | -0,1008 | 0,0059  |
| Trois jours        | -0,0980           | 0,0735  | 0,0245  | 0,0771            | -0,0819 | 0,0048  |

Effet des variables d'offre sur les probabilités de choix modal

|                            | Effet probabilité |           |           |
|----------------------------|-------------------|-----------|-----------|
|                            | Voiture           | Train     | Avion     |
| Tous motifs confondus      |                   |           |           |
| prix routier               | -0,00128          | 0,00096   | 0,00032   |
| temps routier*revenu <13   | -0,00083          | 0,00063   | 0,00021   |
| temps routier*revenu 13-20 | -0,00153          | 0,00115   | 0,00038   |
| temps routier*revenu >20   | -0,00190          | 0,00142   | 0,00047   |
| prix ferroviaire           | 0,00044           | -0,00047  | 0,00003   |
| temps fer*revenu <13       | 0,00055           | -0,00059  | 0,00003   |
| temps fer*revenu 13-20     | 0,00120           | -0,00128  | 0,00008   |
| temps fer*revenu >20       | 0,00124           | -0,00132  | 0,00008   |
| prix aérien                | 0,00010           | 0,00002   | -0,00012  |
| temps aérien*revenu <13    | 0,00038           | 0,00007   | -0,00045  |
| temps aérien*revenu 13-20  | 0,00079           | 0,00015   | -0,00094  |
| temps aérien*revenu >20    | 0,00083           | 0,00016   | -0,00098  |
| Motif privé                |                   |           |           |
| prix routier               | -0,001137         | 0,000853  | 0,000284  |
| temps routier*revenu <13   | -0,000451         | 0,000339  | 0,000113  |
| temps routier*revenu 13-20 | -0,000800         | 0,000600  | 0,000200  |
| temps routier*revenu >20   | -0,001542         | 0,001156  | 0,000385  |
| prix ferroviaire           | 0,000778          | -0,000827 | 0,000049  |
| temps fer*revenu <13       | 0,000148          | -0,000157 | 0,000009  |
| temps fer*revenu 13-20     | 0,000506          | -0,000537 | 0,000032  |
| temps fer*revenu >20       | 0,000866          | -0,000920 | 0,000054  |
| prix aérien                | 0,000120          | 0,000022  | -0,000142 |
| temps aérien*revenu <13    | 0,000377          | 0,000071  | -0,000448 |
| temps aérien*revenu 13-20  | 0,000507          | 0,000095  | -0,000602 |
| temps aérien*revenu >20    | 0,000829          | 0,000156  | -0,000985 |
| Motif professionnel        |                   |           |           |
| prix routier               | -0,002697         | 0,002003  | 0,000693  |
| temps routier*revenu <13   | -0,006752         | 0,005016  | 0,001736  |
| temps routier*revenu 13-20 | -0,006670         | 0,004955  | 0,001715  |
| temps routier*revenu >20   | -0,006161         | 0,004577  | 0,001584  |
| prix ferroviaire           | 0,001143          | -0,001302 | 0,000158  |
| temps fer*revenu <13       | 0,004744          | -0,005401 | 0,000657  |
| temps fer*revenu 13-20     | 0,005153          | -0,005867 | 0,000714  |
| temps fer*revenu >20       | 0,004169          | -0,004746 | 0,000577  |
| prix aérien                | 0,000101          | 0,000040  | -0,000141 |
| temps aérien*revenu <13    | 0,000835          | 0,000334  | -0,001168 |
| temps aérien*revenu 13-20  | 0,001178          | 0,000471  | -0,001649 |
| temps aérien*revenu >20    | 0,000502          | 0,000201  | -0,000703 |

## BIBLIOGRAPHIE

**Armstrong P., Carrido R. et Ortuzar J.D.** (2001), « Confidence intervals to bound the value of time », *Transportation Research Part E*, volume 37, pages 143-161.

**Bates J., Roberts M.** (1986), « Value of time research: Summary of methodology and findings », 14<sup>th</sup> PTRC Summer Annual Meeting, University of Sussex, U.K., 14-18 July.

**Bates J.J.** (1987), « Measuring travel time values with a discrete choice model: A note », *Economic Journal*, volume n°97, pages 493-498.

**Becker G.S.** (1965), « A theory of the allocation of time », *The Economic Journal*, volume 75, pages 493-517.

**Ben-Akiva M., Lerman S.T.** (1985), « Discrete choice analysis: Theory and application to travel demand », *MIT Press, Cambridge, Massachusetts*.

**Ben-Akiva, M., D. Bolduc** (1991), « Multinomial probit with autoregressive error structure », *Département d'économie, Université de Laval, Cahier 9123*.

**Ben-Akiva M., Bolduc D., Bradley M.** (1993), « Estimation of travel choice models with randomly distributed values of time », *Transportation Research Record*, n° 1413, pages 88-97.

**Biddle J., Hamermesh D.** (1990), « Sleep and the allocation of time », *Journal of Political Economy*, Volume 98, pages 922-943.

**Bierlaire M.** (1995) « Mathematical models for transportation demand analysis » sous la direction de P. Toint, Université de Namur Belgique.

**Billot A., Thisse J.F.** (1995), « Modèles de choix individuels discrets : théorie et applications à la micro-économie », *Revue Economique*, volume 46, n°3, pages 921-931.

**Bolduc D.** (1992), « Estimation of travel choice models with randomly distributed values of time », *PTRC, 20<sup>th</sup> Summer Annual Meeting*.

**Bolduc D., Kaci M.** (1993), « Estimation des modèles probit polytomiques : un survol des techniques » *Revue Economique*, Volume 69, n°3.

**Bolduc, D.** (1994) « A practical technique to estimate multinomial probit models in transportation: Computational details and application to a disaggregate mode choice problem », Working Paper, Université de Laval (Québec).

**Bolduc D.** (1999), « A practical technique to estimate multinomial probit models in transportation », *Transportation Research*, Part B, volume 33.

**Bolduc D., Portin B., Gordon S.** (1997), « Multinomial probit estimation of spatially interdependence choices: Computational of two new techniques », Working Paper, Université de Laval (Québec).

**Bonnafous A.** (1989), « Le siècle des ténèbres de l'économie », Economica, Paris.

**Bonnafous A., Plassard F., Vulin B.** (1993), « Circuler demain », Datar, éditions de l'aube.

**Börsch-Supan A. et Hajivassiliou V.A.** (1990), « Smooth unbiased multivariate probability simulators for maximum likelihood estimation of limited dependant variable models », Working Paper, Yale Univeristy.

**Bouyaux P.** (1988), « Modélisation désagrégée de la demande de transport urbain : une application à la ville de Rennes », *Revue d'Economie Régionale et Urbaine*, volume n°5, pages 783-810.

**Bouyaux P.** (1989), « Une difficulté d'interprétation de l'approche Logit : l'exemple de l'économie des transports », *Economie et Prévision*, volume 91, n°5, pages 119-131.

**Carson R.T., Louvière J.J., Anderson D.A., Arabie P., Bunch D.S., Hensher D.A., Jonshon R.M., Kuhfeld W.K., Steinberg D., Swait J., Timmermans H., Wiley J.B.** (1994), « Experimental analysis of choice », *Marketing Letters*, n°5, pages 351-368.

**Causse A.** (1999), « La valeur du temps de transport : de l'usage des théories micro-économiques de l'affectation du temps dans les modèles désagrégés aléatoires de transport », Thèse de doctorat de l'Université de Montpellier 1.

**Commissariat Général du Plan** (1992), « Transport 2010 », La Documentation Française.

**Commissariat Général du Plan** (1994), « Transport : Pour un meilleur choix des investissements », La Documentation Française.

**Commissariat Général du Plan** (2001), « Transports : choix des investissements et coût des nuisances », La Documentation Française.

**Conférence Européenne des Ministres des Transports** (1981), « Bilan de la modélisation de la demande : confrontation prévisions/Résultats dans les transports urbains et interurbains », Table Ronde 58.

**Conférence Européenne des Ministres des Transports** (1999), « Recherche en économie des transports et décision politique ».

**Conférence Européenne des Ministres des Transports** (2001), « Evaluer les avantages des transports ».

**De Palma A., Thisse J.F.** (1989), « Les modèles de choix discret », *Annales d'Economie et de Statistique*, volume 14, pages 151-190.

**De Serpa A. J.** (1971), « A theory of the economics of time », *Economic Journal*, volume n°81, pages 828-845.

**De Serpa A.J.** (1973), « Microeconomic theory and the valuation of travel time: Some clarifications », *Regional Science and Urban Economics*, Volume 2, pages 401-410.

**Dix M.C., Goodwin P.B.** (1982), « L'avenir de l'utilisation de l'automobile », Tables rondes 55/56/57, CEMT, Paris.

**Dupuy J.P.** (1975), « Valeur sociale et encombrement du temps », *Monographies du Séminaire d'Econométrie, CEREBE, Edition du Centre National de la Recherche Scientifique*.

**Evans A.W.** (1972), « On the theory and the valuation and allocation of time », *Scottish Journal of Political Economy*, volume n°2, pages 1-17.

**Fei J.** (1998), « Choix modal et système logistique en transport de marchandises : modélisation, analyse économique et prévision du comportement du chargeur », Thèse de doctorat, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées.



- Galvez T.E., Jara-Diaz S.R.** (1998), « On the social valuation of travel time savings », *International Journal Of Transport Economics*, volume 25, n°2, pages 205-218.
- Gaudry M., Jara-Diaz S.R., Ortuzar J.D.** (1987), « Value of Time sensitivity to model specification », CRT 541, Université de Montréal.
- Gerken J.** (1991), « Generalized logit model », *Transportation Research*, Part B, volume 25, pages 75-88.
- Ghazouani S, Goaid M.** (1993), « Analyse micro-économétrique de la demande de transport urbain pour la ville de Tunis », *Economie et Prévision*, volume 108, pages 47-61.
- Gonzalez R.M.** (1997), « The value of time : A theoretical review », *Transport Reviews*, volume 17, n°3, pages 245-266.
- Gourieroux C.** (1989), « Économétrie des variables qualitatives », *Economica*, 2<sup>e</sup> édition.
- Gronau R.** (1986), « Home production – A survey », *Handbook of Labour Economics*, édité par O. Ashenfelter et R. Layard, Amsterdam, North-Holland.
- Hajivassiliou V.A., McFadden D., Ruud P.** (1992), « Simulation of multivariate normal rectangle probabilities: Method and programs », *Working Paper, Cowles Foundation for Research in Economics, Yale University*.
- Hajivassiliou V.A., McFadden D., Ruud P.** (1996), « Simulation of multivariate normal rectangle probabilities and their derivatives: Theoretical and computational results », *Journal of Econometrics*, volume 72.
- Hammadou H.** (2000), « Mobilité à longue distance et modélisation du choix modal : le cas des zones françaises desservies par TGV d'après l'enquête transports et communication 1993/1994 », *Rapport pour le Ministère de l'Équipement des Transports et du Logement, SES-DAEI*.
- Hausman, J.** (1978) « Specification tests in econometrics », *Econometrica*, n°46, p1251-1271.
- Hausman J., McFadden D.** (1984), « A specification test for multinomial Logit model », *Econometrica*, volume n°52, pages 1219-1240.

**Hensher D.A.** (1994), « Stated preference analysis of travel choices : The states of practise », *Transportation*, volume 21, pages 107-134.

**Hensher D.A.** (1995), « Value of travel time savings in personal and commercial automobile travel », *Institute of Transport Studies*, ITS-WP-95-4.

**Hensher D.A.** (2001), « The sensitivity of the valuation of travel time savings to the specification of unobserved effects », *Transportation Research*, Part E, volume 37, pages 129-142.

**Hensher D.A., Jonshon L.W.** (1981), « Applied discrete choice modeling », New-York, Wiley.

**Hensher D.A. et Greene W.H.** (1999), « Specification and estimation of Nested Logit Models », Mimeo.

**Hensher D.A., Button K.** (2000), « Handbook of transport modelling », Pergamon.

**Inrets** (1988), « Modèles désagrégés de choix modal : réflexions méthodologiques autour d'une prévision d trafic », rapport n°67.

**Inrets** (1997), « Modèle MATISSE, description détaillée de la version du 14/05/97 », Document Technique INRETS.

**Inrets** (1997), « Modèle MATISSE, test de la version du 14/05/97 », Document Technique INRETS.

**Jara-Diaz S.R.** (1990), « Income and taste in mode choice models: Are they surrogates ? » *Transportation Research*, 25B(5), pages 341-350.

**Jara-Diaz S.R.** (1994), « A general micro-model of user's behavior: The basic issues », *Preprints of the Seventh International Conference on Travel Behaviour Research*, Valle Nevado, Santiago, Chile, 13-16 June.

**Jara-Diaz S.R.** (2000), « Allocation and valuation of travel time savings », *Handbook of Transport Modelling*, Elsevier.

**Jara-Diaz S.R., Farah H.** (1987), « Transport demand and user's benefits with fixed income: The goods/leisure trade-off revisited », *Transportation Research*, 21B (2), pages 165-170.

**Jara-Diaz S.R., Videla J.I.** (1989), « Detection of income effect in mode choice: Theory and application », *Transportation Research*, 23B (6), pages 393-400.

**Jara-Diaz S.R., Videla J.I.** (1990), « Welfare implications of the omission of income effect in mode choice models », *Journal of Transport Economics and Policy*, volume 9, pages 83-93.

**Johnson M.** (1966), « Travel time and the value of leisure », *Western Economic Journal*, volume 4, pages 135-145.

**Juster F., Strafford F.** (1991), « The allocation of time: Empirical findings, behavioral models and problems of measurement », *Journal of Economic Literature*, volume 29, pages 471-522.

**Laferrière R.** (1993), « Les élasticités-prix de la demande de transport interurbain des personnes » *Les Cahiers Scientifiques du Transport*, volume n°27, pages 37-70.

**Lancaster K.J.** (1966), « A new approach to consumer theory », *Journal of Political Economy*, volume 74, pages 132-157.

**Leurent F.** (1998), « Les valeurs du temps des automobilistes à Marseille en 1995 », *Recherche Transports Sécurité* n°60, pages 19-37.

**Liem T., Gaudry M., Laferrière R.** (1993), « SHARE: The S-1 to S-5 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 » CRT 899, Université de Montréal.

**Louvière J.L.** (1992), « Experimental choice analysis : Introduction and overview », *Journal of Business Research*, volume 24, pages 89-95.

**Mattson L.G., Weibull J.W.** (2000), « Probabilistic choice as a result of mistakes ».

**McFadden D.** (1974), « The measurement of urban travel demand », *Journal of Public Economics*, volume 3, pages 303-328.

**McFadden D.** (1989), « A method of simulated moments for estimation of the multinomial probit without numerical integration », *Econometrica*, volume 57.

**McFadden D.** (1991), « Advances in computation, statistical methods, and testing of discrete choice models », *Marketing Letters*, volume 2, pages 215-229.

**McFadden D.** (1995), « Computing willingness to pay in random utility models » Working Paper, Department of Economics, University of California.

**McFadden D.** (2000), « Disaggregate behavioral travel demand's RUM side : A 30-years retrospective », Department of Economics, University of California, Berkeley.

**McFadden D., Train K.** (2000), « Mixed MNL models for discrete response », *Journal of Applied Econometrics*, forthcoming.

**Merlin P.** (1994), « Les transports en France », La documentation Française.

**MVA Consultancy**, Institute of Transport Studies University of Leeds and Transport Studies Unit University Oxford (1987), « The value of travel time savings », *Policy Journals, London, England*.

**O'Dea W.P.** (1994), « The value of time saving to an individual », *International Journal of Transport Economics*, volume XXI n°3.

**Oort O.** (1969), « The evaluation of travelling time », *Journal of Transport Economics and Policy*, volume 3, pages 279-286.

**Ortuzar J., Willumsen L.** (1994), « Modelling transport », Wiley.

**Pakes A., Pollard D.** (1989), « Simulation and asymptotics of optimization estimators », *Econometrica*, Volume 57.

**Piron V.** (1996) « Les valeurs du temps dans les infrastructures de transport », *Transports* n°377, page 189-194.

**Quinet E., Touzery L., Triebel H.** (1982), « Economie des transports », Economica, Paris.

**Quinet E.** (1998), « Principes d'économie des transports », Economica.

**Schéou B.** (1996), « Modélisation des déplacements domicile-travail en milieu péri-urbain : le cas de la région Lyonnaise », », Thèse de doctorat, Université de Lyon 2.

**Small K.** (1982), « Scheduling on consumer activities: Work trips », *American Economic Review*, volume 72, pages 467-479.

**Svenson O.** (1998), « The perspective from behavioral decision theory : On models of travel choice », *Theoretical foundations of travel choice modelling*, New York, Pergamon Press, pages 141-172.

**Talvitie A.** (1973), « Agregate travel demand analysis with disaggregate or aggregate demand models », *Proc. Trans. Research Forum*, pages 583-603.

**Thomas A.** (2000), « Économétrie des variables qualitatives », Dunod.

**Train K.** (1998), « Recreation demand models with taste differences over people », forthcoming, *Land Economics*, volume 74, n°2.

**Train K., Mc Fadden D.** (1978), « The goods/leisure trade-off and disaggregate work trip mode choice models », *Transportation Research*, volume 12, pages 349-353.

**Truong T.P., Hensher D.A.** (1985a), « Measurement of travel time values and opportunity cost from discrete-choice model », *The Economic Journal*, volume 95, pages 438-451.

**Truong T.P., Hensher D.A.** (1985b), « Valuation of travel time saving : A direct experimental approach », *Journal of Transport Economics and Policy*, volume 19, pages 237-261.

**Truong T.P., Hensher D.A.** (1987), « Measuring travel time values with discrete choice model : A reply », *The Economic Journal*, pages 499-501.

**Van de Vyvere Y.** (1994), « Stated preference decomposition modelling and residential choice », *Geoforum*, volume 25, pages 189-202.

**Van de Vyvere Y.** (1995), « Les modèles de choix discret et la planification des transports », HCG, Interim Report.

**Wardman M.** (1998), « The value of travel time : a review of british evidence », *Journal of Transport Economics and Policy*, volume 32 (3), pages 285-316.

**Waters II W.G.** (1994), « The value of travel time savings the link with income : Implications for public project evaluation », *International Journal of Transport Economics*, volume 21, n°3, pages 243-253.

**Wrigley N.** (1985), « Categorical data analysis for geographers and environmental scientists » London, Longman.





## **MODELISATION DU CHOIX MODAL VOYAGEURS SUR LES DÉPLACEMENTS LONGUE DISTANCE : LA VALEUR DU TEMPS**

Dans le cadre de l'évaluation des grands projets d'infrastructure transports, les problèmes liés au choix des moyens de transports par l'utilisateur revêtent une importance stratégique et particulière. A ce jour, en France, les décideurs ont souvent recours à des valeurs dites tutélaires (valeurs du temps fixées à priori) lors de l'estimation de la rentabilité socio-économique des projets en interurbain. Malgré tout, depuis quelques années des efforts importants ont été entrepris en matière de recueil de l'information concernant les déplacements à longue distance (enquêtes ménages structurelles, panels,...) efforts qui constituent un préalable nécessaire mais non suffisant à une meilleure évaluation des projets. L'objet central de cette thèse vise en conséquence à mesurer l'influence sur le choix d'un mode de transport à longue distance de facteurs économiques tels que les différentiels de coûts monétaires, de temps de transport, d'accessibilité et ceci grâce à la mise en œuvre de modèles multinomiaux de choix discrets sur données individuelles. Pour un usager donné, dans un contexte déterminé, la probabilité de choix d'un moyen de transport particulier est égale à la probabilité que ce mode de transport procure un niveau d'utilité plus élevé que les modes de transports alternatifs. La spécification des modèles économétriques à tester repose donc, d'une part sur la forme choisie pour la partie déterministe de la fonction d'utilité et d'autre part sur la partie aléatoire. A partir des résultats de ces estimations individuelles, il appartient ensuite au concepteur de réfléchir aux problèmes d'agrégation de ces décisions micro-économiques, en vue de la mise en œuvre de prévisions de flux de voyageurs robustes sur des axes géographiques précis. On voit dès lors pour les décideurs publics, tout l'intérêt de disposer d'estimations rigoureuses et quantifiables de ces valeurs qui devraient permettre une meilleure évaluation des projets d'infrastructures.

### **MODELLING OF THE TRAVELLER'S MODE CHOICE ON LONG-DISTANCE TRANSPORTS : THE VALUE OF TRAVEL TIME**

Within the framework of the evaluation of infrastructure projects, the problems bound to the user's choice of transport means has a strategic importance.

In France, the public decision-makers often appeal to values called tutelary values (fixed values of time) for the estimation of the socio-economic profitability of interurban projects. Nevertheless, important efforts have been realised in the collection of the information concerning long-distance trips. This preliminary step is necessary for a better evaluation of projects. The main object of this thesis is to measure the influence on the long-distance mode choice of economic factors such as differences in monetary costs, travel time, accessibility... For doing so, we implement multinomial models of discrete choice on individual data. For a given user, the probability of the choice of one particular mean of transport is equivalent to the probability that this mean of transport gets a higher utility level than the other ones. The econometric models to be tested are closely linked on the one hand to the form of the determinist term of the utility function and on the other hand to the random term. From the results of these individual estimates, it is up to the designer to think about the problems of aggregation of these microeconomic decisions. The goal is to implement relevant forecasts of traffic flows on precise geographic axes. We can easily see the interest for the public decision-makers to get rigorous estimates of these values which should allow a better evaluation of infrastructure projects.

**Mots clés :** microéconométrie, choix des transports, théories des choix discrets, valeur du temps, choix modaux, modèles de trafic.

**Laboratoire MÉDEE** (Mécanismes Économiques et Dynamiques des Espaces Européens),  
Faculté des Sciences Economiques et Sociales, Bât. SH2, Université des Sciences et  
Technologies de Lille, 59655 Villeneuve d'Ascq Cedex.