

THESE DE DOCTORAT, UNIVERSITE PARIS 1 PANTHEON-SORBONNE
Discipline: Sciences Economiques

présentée et soutenue publiquement par

Matthieu de Lapparent
le 29 juin 2004

De la valeur du temps à la valeur du risque de perte en temps dans les transports : le cas des déplacements domicile-travail.

Directeur de thèse:
Madame le Professeur Jacqueline Pradel

JURY

M. le Professeur Denis Bolduc, Université Laval (Québec, Canada)
Mme. le Professeur Michèle Cohen, Université de Paris 1 (Paris, France)
M. le Professeur André de Palma, Université de Cergy-Pontoise (Cergy-Pontoise, France)
M. le Professeur Marc Gaudry, Université de Montréal (Montréal, Canada)
Mme. le Professeur Jacqueline Pradel, Université de Paris 1 (Paris, France)
M. le Professeur Jean-Marc Robin, Université de Paris 1 (Paris, France)

**Publication AJD-81,
Agora Jules Dupuit, Université de Montréal**

Obtenu avec la mention très honorable avec les félicitations du jury à l'unanimité, une proposition pour un prix de thèse et pour une subvention pour publication.

L'UNIVERSITE DE PARIS I PANTHEON-SORBONNE n'entend donner aucune approbation ni improbation aux opinions émises dans les thèses ; ces opinions doivent être considérées comme propres à leurs auteurs.

Résumé :

Cette thèse étudie les mécanismes individuels de valorisation du temps et de sa variabilité dans le contexte de déplacements domicile-travail. Les concepts de valeurs et primes de fiabilité du temps de transport sont présentés et discutés.

Nous explicitons d'abord les facteurs constitutifs de la demande de transport, l'ensemble des choix spatiaux, calendaires et technologiques réalisables, et leurs influences sur le bien être de l'individu en termes de consommation, loisir et mobilité. Nous précisons ensuite les conditions de notre analyse pour un déplacement particulier, reposant sur une séparation des préférences par motif d'activité.

Selon la nature de l'environnement, le comportement de choix d'un individu se modélise différemment. En information parfaite, la théorie microéconomique du consommateur est suffisante. En présence de risque, nous utilisons la théorie de l'espérance d'utilité dépendante du rang, qui distingue l'attitude face au risque (optimisme, pessimisme) de la perception du niveau du bien-être.

Nous appliquons nos problématiques à deux cadres empiriques: le choix du mode de transport en Ile-de-France et le choix d'un itinéraire aérien sur le corridor Paris-Londres. Le champ des modèles probabilistes de choix discrets est large. Nous détaillons ceux qui nous sont utiles: transformations de Box-Cox, paramètres aléatoires, hétéroscédasticité des perturbations interviennent dans des modèles Logit et Probit dichotomiques. Nos résultats expliquent l'impact des offres technologiques et tarifaires sur les choix du mode de transport et fournissent une gamme de valeurs et primes de fiabilité du temps utiles pour la planification de l'offre de transport.

Mots clé: demande individuelle de transport, déplacements domicile-travail, modes et itinéraires de transport, théorie de l'espérance d'utilité dépendante du rang, modèles économétriques de choix discrets, valeur du temps, primes de couverture contre la perte de temps.

Remerciements.

Je me suis longtemps demandé comment exprimer mes remerciements. Beaucoup ont contribué de près ou de loin à ce travail, que ce soit d'un point de vue scientifique ou plus personnel. Délicate est la tâche de reconnaître l'apport de chacun, les opinions et arguments exposés étant plus certainement complémentaires que substituables dans leur diversité.

Il est difficile de rêver mieux que Jacqueline Pradel pour directeur de thèse. Elle a su me laisser libre de mes orientations tout en étant présente chaque fois que j'ai eu besoin de ses conseils, que ce soit pour fournir une idée importante au moment où j'en manquais, pour me recadrer quand mes centres d'intérêt divergeaient trop fortement, où pour me rassurer quand le doute s'installait. Elle a su me convaincre de faire certains choix qui ne me plaisaient pas ou d'abandonner certaines formulations auxquelles je tenais dans mes travaux. Plus têtue que je suis borné, elle y est parvenue et je l'en remercie car je pense aujourd'hui qu'elle avait raison. Ses nombreuses remarques, suggestions et intuitions ont orienté favorablement mes recherches.

L'apport scientifique de Marc Gaudry à mon travail est considérable. Ses conseils avisés, sa grande connaissance du domaine des transports et son écoute attentive m'ont été très utiles. Ses commentaires m'ont permis de grandement enrichir mon texte et m'ont aussi rassuré sur le fait que mon travail valait d'être présenté. Toujours disponible pour tenter de répondre à mes questions, je le remercie grandement pour son investissement personnel et son soutien dans toutes mes démarches. Ses travaux m'ont permis de développer de nombreuses interprétations des résultats que je présente.

Je ne peux oublier de témoigner ma reconnaissance à Philippe Jolivaldt, qui me fait profiter de son expérience professionnelle et personnelle sur de nombreux sujets. Je suis reconnaissant de sa très grande disponibilité et son écoute.

Je remercie également mes rapporteurs et membres du jury : Denis Bolduc,

Michèle Cohen, Marc Gaudry, André de Palma et Jean-Marc Robin, et Jacqueline Pradel. Je suis reconnaissant de leurs participations actives à ce projet. J'ai pu bénéficier de leurs remarques, me permettant de préciser certains résultats. Faire face à leurs exigences est une opportunité que je ne peux manquer. J'espère que ce travail saura les satisfaire.

André de Palma a fourni une partie des données statistiques utilisées dans cette thèse. Je suis infiniment reconnaissant de ce geste généreux sans lequel je n'aurais pu aboutir. Les explications et le travail préliminaire de Cédric Fontan et Dany N'Guyen sur cette base de données ont facilité mon travail. Je remercie aussi la compagnie Air France de m'avoir fourni les bases de données complétant les applications développées.

Difficile de séparer mon activité de recherche de celle d'enseignement. Je souhaite remercier tous les professeurs, maîtres de conférence pour lesquels j'ai travaillé, et les universités qui m'ont employé. Jacqueline Pradel, Philippe Jolivaldt et Mireille Chiroleu-Assouline à l'Université Paris 1 Panthéon-Sorbonne, Claudine Dhuin et Nicole Serpollier à l'Université Paris IX Dauphine, m'ont offert ce privilège.

Karen est devenue ma femme pendant ce travail de thèse. Son soutien inconditionnel, sa douceur et sa tendresse m'ont permis de surpasser les moments difficiles. Karen, merci, je t'aime. Mes parents ont eu un très grand rôle dans ce projet en offrant un environnement idéal à sa réalisation et en m'enseignant les valeurs d'humilité et d'honnêteté avec lesquelles j'essaye aujourd'hui d'aborder mon travail scientifique. Sans leur volonté persistante et leur confiance aveugle, que je n'ai pas toujours acceptées, je n'aurais jamais mis les pieds à l'université après mes noires années de lycée. Papa, Maman, je suis fier de vous. Je n'oublie pas ma petite sœur, Eléonore, dont la capacité à me contredire est extraordinaire. Peut être est-ce la mienne à l'ennuyer, je préfère ne pas savoir. . . . Petite sœur, je t'embrasse. Les conseils de ma grand-mère, Anne-Marie, sur la façon de réaliser une thèse en moins de quatre années ont été judicieux. Je lui souhaite grand courage pour définitivement finir la publication de la sienne. Ma famille est trop grande pour que je puisse citer tous ceux qui se sont intéressés de près ou de loin à mon travail : Audrey, Charlotte, Claudine, Catherine, Emmanuel, Fabrice, Gilles, Irène, Jacques, Martine, Michel, Renaud, Samuel, Suzy, Thomas et Thomas, et tous ceux que j'oublie au moment où j'écris ces lignes, je pense souvent à vous. Une pensée particulière à ceux qui ne sont plus, vous me manquez.

Ces quatre années au sein du laboratoire EUREQua ont été enrichissantes d'un

point de vue personnel. Je remercie grandement son directeur, Hubert Kempf, de m'accueillir en son sein. Je remercie également Tonia Lastapis pour avoir accepté mon incompétence notoire concernant les différentes procédures administratives à respecter. Je remercie tous ses membres, particulièrement l'ensemble des anciens et nouveaux doctorants avec qui j'ai vécu au quotidien, d'avoir accepté, sinon toléré avec courtoisie, ma nervosité et mon impulsivité. J'ai apprécié les nombreux échanges que nous avons eu sur de nombreux sujets. Audrey, Christophe, Djamel, Emilie, Eric, Guillaume, Marie, Nicolas, Othman, Pascale, Thomas, et tous les autres, merci d'avoir partagé ces moments.

Enfin, merci à mes amis et connaissances. En particulier, Antoine, Claire, Dominique, François, Laurent, Philippe, qui me supportent depuis de nombreuses années : je n'ai pas l'intention d'arrêter cette aventure maintenant.

Table des matières

Remerciements.	a
Introduction générale.	1
1 Les facteurs constitutifs de la demande individuelle de transport.	8
Introduction.	8
1.1 Décisions de long terme : localisation résidentielle et capital automobile.	10
1.1.1 Offre immobilière et valeur d'un logement.	11
1.1.2 Structure du ménage et choix résidentiel.	14
1.1.3 Investissements en capital automobile.	17
1.2 Demande d'activités à court terme et choix de destinations.	19
1.2.1 Agglomération spatiale et activité économique.	22
1.2.2 Prismes espace-temps individuels.	24
1.3 Modes de transport.	28
1.4 Itinéraires et horaires.	34
Conclusion : quelles interactions ?	38
2 L'analyse microéconomique de la demande de transport : le rôle central de la valeur du temps.	41
Introduction	41
2.1 Le modèle.	43
2.1.1 L'espace des paniers consommables.	43
2.1.2 Préférences et choix rationnel.	44
2.1.3 L'équilibre du consommateur.	46
2.1.4 Choix de transport.	52
2.1.5 L'analyse du choix du mode de transport pour un déplacement.	55
2.2 Les valeurs du temps de transport.	59
2.2.1 Motivations.	59
2.2.2 Définition.	60
2.2.3 Propriétés.	62
Conclusion.	68
3 Modèles économétriques pour l'analyse du choix du mode de transport.	70
Introduction.	70
3.1 Le cadre.	71
3.1.1 L'univers probabilisé.	71
3.1.2 Utilité et probabilité de choix.	72

3.2	Modèles statistiques paramétriques.	74
3.2.1	Définition.	74
3.2.2	Le processus générateur des données.	77
3.2.3	Propriétés des probabilités de choix : stratégies d'identification.	79
3.3	Le modèle Logit multinomial non emboîté et ses extensions.	83
3.3.1	Hétéroscédasticité.	88
3.3.2	Paramètres aléatoires.	89
3.4	Le modèle Probit non ordonné et ses extensions.	93
3.4.1	Définition.	94
3.4.2	Cas particuliers.	98
	Conclusion.	100
4	Déplacements domicile-travail et choix du mode de transport en Ile-de-France : variations autour d'un thème.	103
	Introduction.	103
4.1	Présentation des données.	105
4.1.1	L'enquête générale de transport, 1997.	105
4.1.2	La reconstruction des offres de transport.	107
4.1.3	Description de l'échantillon.	110
4.2	Spécifications économétriques : discussion.	113
4.3	Résultats et commentaires.	118
4.3.1	Interprétations.	119
4.3.2	Analyse des valeurs du temps.	124
	Conclusion.	129
	Annexe : résultats des estimations.	132
5	Optimisme, pessimisme, primes de couverture contre le risque de perte en temps : une application aux déplacements aériens professionnels.	136
	Introduction.	136
5.1	Le cadre théorique.	140
5.1.1	Axiomatique.	141
5.1.2	Propriétés générales.	145
5.2	Primes d'épargne de temps de transport.	146
5.2.1	Le modèle.	146
5.2.2	Définition.	148
5.2.3	L'influence de l'attitude face au risque de perte.	150
5.2.4	Particularités.	150
5.3	Application au choix d'itinéraires aériens.	153
5.3.1	Le modèle d'échantillonnage.	153
5.3.2	Présentation des données.	156
5.3.3	Résultats et commentaires.	162
	Conclusion.	166
	Conclusion générale	169
	Bibliographie.	173

Table des figures

1-1	Zonage Ile-de-France, Shéma de la direction générale de l'équipement	9
1-2	La formation de la demande individuelle de transport	39
2-1	Effets d'une augmentation du temps de transport à demande de mobilité donnée.	48
2-2	Effets d'une augmentation du temps de transport à demande de mobilité endogène.	52
4-1	Désagrégation des modes de transport.	109
4-2	Distribution des revenus brut annuels conditionnellement à la tranche d'âge du travailleur.	111
4-3	Types de corridors origine-destination pour le déplacement domicile-travail.	111
4-4	Nombre de véhicules par actif dans le ménage.	112
4-5	Répartition des horaires de début de l'activité travail.	113
4-6	Transformation de Box-Cox.	115
4-7	Paires "coût-valeur du temps" estimées	128
4-8	Distribution estimée de la valeur horaire du temps sur l'échantillon observé, modèle Box-Cox Logit, mode véhicule particulier.	130
4-9	Distribution estimée de la valeur horaire du temps de transport, modèle Box-Cox Logit, mode transports en commun.	130
5-1	La valeur du temps certain : représentation dans le cadre EUDR. . .	152
5-2	Représentation des itinéraires Paris-Londres.	157
5-3	Evolution de la distribution des temps de trajet : vol CDG-LCY . . .	159
5-4	Evolution de la valeur de l'équivalent certain, vol CDG-LCY.	164
5-5	Durée de vol programmée : évolution de la prime de couverture complète	165

Liste des tableaux

4.1	Types de spécifications économétriques utilisées pour l'application. . .	117
4.2	Réponses de la fonction valeur du temps, modèle Box-Cox Logit . . .	126
4.3	Valeurs horaires des temps de trajet, en euros, modèles ajustés. . .	126
4.4	Statistiques descriptives des valeurs horaires du temps par mode de transport, en euros, modèle Box-Cox Logit	129
4.5	Table des estimations des modèles	132
4.6	Table des estimations des modèles (suite)	133
4.7	Table des estimations des modèles (suite)	134
4.8	Table des estimations des modèles (suite et fin)	135
5.1	Estimations des paramètres du modèle.	162
5.2	Table de prédiction des choix avec le modèle ajusté	166

Introduction générale.

Dans les grandes agglomérations, les systèmes de déplacements urbains se caractérisent à la fois par un phénomène persistant de congestion et une crise du financement des infrastructures. La première s'explique par le développement de la mobilité motorisée, en particulier la montée des déplacements en voiture particulière. Les réseaux de transport existant s'adaptent à rythme beaucoup plus lent que le développement des zones périphériques urbaines résultant du processus d'agglomération spatiale. Les conditions de circulation sur les arcs des réseaux routiers se dégradent : les temps de trajets augmentent. Parallèlement, un manque de financement des transports urbains se manifeste. Difficilement rentables, les ressources financières limitées des agglomérations contraignent tout développement massif de l'offre de transports publics. Une diminution, au mieux au stagnation, de la part de marché des modes de transport public s'observe. Cet état des faits n'est pas soutenable à long terme et impose de préciser les facteurs étant la source de la formation et la répartition spatiale des flux de voyageurs. Ces derniers sont naturellement définis par la somme dans l'espace et le temps des calendriers d'activités de toute la population. Nous devons expliciter comment ces derniers sont résultats de comportements individuels rationnels.

Plusieurs raisons militent en faveur de la gestion de la demande de transport en milieu urbain, qui vise principalement à réduire la circulation automobile en incitant les voyageurs à modifier leurs comportements de mobilité. Les politiques de gestion de la demande touchent à toutes les dimensions des déplacements : le besoin de se déplacer, le choix du mode de déplacement, le choix du trajet ou encore le choix du moment du déplacement. Nous concentrons notre analyse sur le choix du mode de transport, reconnu comme facteur central de la détermination des volumes de voyageurs sur les réseaux, eux-mêmes déterminant par leurs usages collectifs leurs attractivités et efficacités relatives en termes de temps et coût. Parmi les mesures les

plus souvent avancées, l'amélioration des infrastructures de transport (accroissement des capacités des certains arcs des réseaux), le covoiturage, la tarification des déplacements, le télétravail et la flexibilisation des horaires de travail. En milieu urbain, les politiques les plus efficaces sont celles qui agissent sur le coût du déplacement (péage, tarification du stationnement, etc...) ou encore sur l'offre de stationnement. La mise en place de péages urbains peut constituer une politique efficace pour orienter les choix de déplacement des individus (choix du mode de transport, des horaires de déplacement, des itinéraires,...) afin de diminuer les phénomènes de congestion du trafic automobile et permettre une augmentation sensible des déplacements en transports collectifs. La gestion de la demande de transport permet aussi d'améliorer l'accessibilité pour l'ensemble de la population, au moins pour certains types d'individus présélectionnés selon des objectifs de bien-être social. Dans un contexte de déconcentration des emplois et des activités, la question mérite réflexion. Les effets externes liés à un usage intensif de l'automobile en milieu urbain, tels la pollution, la dégradation de l'espace urbain, la diminution de la sécurité, sont aussi des problèmes d'actualité qu'il convient de maîtriser. Une meilleure compréhension de la diversité des comportement de demande de transport peut permettre la définition de "policy-mix" ciblés et adaptés à des incitations particulières en accord avec un objectif de développement durable.

Cette thèse propose d'étudier les mécanismes d'arbitrage auxquels fait face un individu actif, vivant son quotidien en milieu urbain, dans l'organisation à court terme de son déplacement associé à son activité de travail et le choix de son mode de transport. La compréhension des causes et leurs effets permet de mettre en évidence les mécanismes incitant à l'utilisation d'un moyen de déplacement particulier. Une attention particulière est portée sur le concept de valeur du temps de transport, taux marginal de substitution s'établissant à l'équilibre allocatif du consommateur. La liste exhaustive de toutes les études à ce sujet est difficile à établir, tant elles sont nombreuses. La seule certitude est que toutes ne s'accordent pas. Elles ne sont pas pour autant contraires : elles exhibent certains résultats communs. Cette propension monétaire à payer caractérise la capacité budgétaire à acheter la rapidité de déplacement. Les gains de temps sont une des motivations majeures des investissements et politiques de transport et leur valorisation est un enjeu fondamental du calcul de leurs rentabilités économiques. Propres à chaque voyageur, la distribution des valeurs du temps d'une population conditionne leurs réalisations. Nous nous devons d'expliquer comment cette propension à épargner le temps de transport est sensible à

différentes caractéristiques, relevant à la fois des caractéristiques socio-économiques et démographique de la population, notamment la distribution des revenus, et des caractéristiques de l'offre sur le marché des transports, c'est-à-dire sur chacun des arcs des réseaux de transport constituant les corridors origines-destination dans lesquels transitent les voyageurs d'une zone géographique à l'autre. Sans prétendre être capable de tous les souligner, nous tentons de préciser avec rigueur les facteurs les plus remarquables.

Cette thèse propose aussi d'élargir le champ théorique et pratique de la modélisation des choix de transport d'un individu à un environnement risqué en termes de temps de trajet. L'introduction de risque environnemental dans les décisions liées au transport offre de nouvelles perspectives dans la compréhension des comportements individuels des voyageurs. Dans notre contexte, les durées de trajet ne sont pas connues avec certitude. Nous entendons par risque l'incertitude probabilisée, c'est-à-dire que l'individu connaît les vraies distributions des temps de parcours. Le concept de valeur du temps se généralise à celui de prime de couverture contre la perte de temps de transport, que nous dénommons prime de fiabilité de l'offre de durée. Il mesure la compensation monétaire permettant au voyageur de conserver le même niveau d'utilité suite à une modification de la distribution du temps de trajet par le moyen de transport qu'il utilise. La valeur du temps n'est qu'un cas particulier parmi de nombreuses interprétations possibles, dépendant de la structure des distributions considérées.

L'objet du premier chapitre est la description des facteurs constitutifs de la demande de transport exprimée par un individu. Nous soulignons qu'elle est fortement dépendante de la structure spatiale de l'agglomération urbaine, la forme et la diversité des réseaux de transports existants. La demande de transport résulte du chevauchement de décisions de long terme et de court terme. A long terme, le choix d'une localisation résidentielle et la détermination d'un niveau de capital automobile et sa fréquence et/ou intensité d'utilisation. A court terme s'établit dans le temps et l'espace le calendrier d'activités souhaitant être réalisé par l'individu : quelles activités ? Quelles fréquences ? Quelles durées ? A quelles heures ? Où les réaliser ? Quels circuit de déplacements ? Par quels modes de transport ? Par quels itinéraires ? La demande de transport résulte de l'organisation dans l'espace et le temps d'une suite d'activités. Nous expliquons quelles sont les interrelations entre les différents facteurs constitutifs de la demande. Pour chacun d'entre eux, nous en caractérisons l'offre et nous expliquons quelles sont les contraintes s'imposant à l'individu et son

ménage dans ce contexte. Nous soulignons l'importance de la contrainte budgétaire dans les décisions de long terme, qui peuvent conduire à la ségrégation spatiale pour les ménages les plus pauvres vivant en milieu urbain, la restriction de leurs espaces-temps dans l'organisation des calendriers d'activités, et la diminution des fréquences de réalisation et niveaux de demandes pour ces dernières.

Le second chapitre précise le contexte théorique dans lequel nous souhaitons étudier le comportement d'arbitrage d'un voyageur. Dans un cadre où les préférences du consommateur peuvent être représentées par une fonction d'utilité, nous présentons un modèle d'arbitrage entre consommation, loisir et mobilité. Nous discutons des conditions d'équilibre et des effets d'une augmentation des coûts ou temps de transport de l'individu sur son niveau d'utilité. Effets substitution et effets revenu composent des effets totaux sur la variation de l'utilité dont les signes sont incertains. À demande de mobilité constante, un effet substitution et un effet revenu entre consommation et loisir conduit à modifier leurs niveaux optimaux. L'effet mobilité se caractérise par le réajustement du niveau de mobilité sur les niveaux de consommation et loisirs suite à la modification des caractéristiques de l'offre de transport. Nous étudions ensuite les conditions permettant d'analyser les déplacements réguliers domicile-travail pour un individu dont la destination est située en dehors du domicile. Le cadre d'analyse est réduit à l'étude d'un déplacement. La modélisation de la demande de transport en séparant les différents déplacements selon les motifs pour lesquels ils sont réalisés simplifie considérablement l'analyse mais impose une séparation fonctionnelle des préférences de l'individu par motif de déplacement pouvant être en désaccord avec la dynamique calendaire de ses activités autres que le travail. Dans la mesure où cette dernière est primante, le premier déplacement à devoir planifier est celui du domicile jusqu'au lieu de travail. Le reste du calendrier s'organise autour de ce bloc activité-transport lié au travail. Nous ignorons les incidences de la planification de l'activité travail et le déplacement qu'elle impose sur le reste du calendrier des autres activités. Nous négligeons aussi les incidences de l'organisation des activités autres que le travail sur les choix de transport pour cette dernière. L'organisation de tournées de déplacements n'est pas considérée. Dans l'approche fondée sur l'analyse d'un déplacement, nous ne caractérisons pas les interrelations spatiales et temporelles agissant sur l'organisation du calendrier d'activités et ses déplacements associés. Nous admettons implicitement l'existence de préférences séparables entre sa demande de transport liée au travail et le reste de ses demandes d'activités et de transport. Nous définissons dans un troisième temps

la valeur du temps de transport : il s'agit de la compensation monétaire que souhaite recevoir l'individu suite à une augmentation du temps de trajet à niveau d'utilité constant. En toute généralité, elle dépend des déterminants de l'utilité d'un voyageur et des conditions tarifaires et technologiques (en terme de vitesse) du marché des transports. Ses propriétés relativement à la richesse de l'individu, son coût et de son temps de transport sont discutées. Nous remarquons que le comportement de la fonction valeur du temps de transport n'est pas unique, et nous détaillons et interprétons les différents contextes à envisager.

Dans un troisième chapitre, nous présentons les modèles statistiques associés à une démarche de validation empirique de nos propos. Les modèles économétriques de choix discrets se sont très fortement développés depuis les trois dernières décennies, notamment dans le domaine de la demande de transport. Nous présentons le cadre probabiliste dans lequel prennent forme nos modèles statistiques paramétriques. En tant que simple observateur, il n'est pas possible de quantifier l'ensemble des déterminants du choix d'un individu. Le modèle d'échantillonnage est défini dans le contexte de la maximisation de ses préférences. Seule la réponse effective à la problématique de choix est observée, et constitue une variable aléatoire pour l'analyste. Chaque individu observé est supposé respecter l'axiome fort des préférences révélées. La probabilité d'échantillonner un individu effectuant un choix donné est définie par la probabilité d'échantillonner un individu qui maximise ses préférences pour ce choix. Nous discutons des formes paramétriques à envisager. L'utilité est conçue comme une combinaison linéaire de fonctions des variables explicatives, dont une partie est considérée comme inobservable. Il s'agit d'une approximation linéaire de l'utilité indirecte du décideur. Une attention particulière est portée à l'identification et l'interprétation des paramètres des modèles. Une partie importante des modèles potentiels est volontairement occultée, l'intérêt étant porté sur les spécifications économétriques adaptées à notre application empirique, exploitant au mieux l'information statistique dont nous disposons.

Le quatrième chapitre présente les résultats et commentaires de notre application au choix du mode de transport pour les déplacements réguliers domicile-travail en Ile-de-France. La base de données utilisées est un échantillon issue de la mini enquête globale de transport (E.G.T.) de 1998, une réactualisation de l'enquête de 1993. La définition de l'ensemble de choix, des variables explicatives, et des modèles statistiques retenus est présentée. Notre application concerne deux modes de transport génériques : transports en commun et véhicule particulier motorisé. Notre cadre se

restreint à un ensemble de choix dichotomique, tenant compte du fait que la petite taille de l'échantillon utilisé, 865 observations seulement, ne permet pas d'introduire plus de diversité dans la description des moyens possibles de transport. La mise en place de tels modèles requiert la connaissance des contenus de toutes les modalités auxquelles fait face le décideur. Nous verrons dans un cadre de préférences révélées concernant le choix du mode de transport comment répondre à cette nécessité. Notre application au choix du mode de transport pour les déplacements domicile-travail en Ile-de-France compare plusieurs modèles. Lorsque la spécification de l'utilité de l'individu n'est pas linéaire en prix ou temps de trajet, les estimations conduisent à penser que le temps de transport est un coût convexe pour le voyageur. Plusieurs résultats robustes sont discutés, notamment les effets du temps du trajet et de son coût sur l'utilité du consommateur et son choix résultant, les effets d'une augmentation de sa richesse. Les résultats des estimations sont commentés. Ils soulignent l'importance de facteurs de différents types : socio-économiques, démographiques, géographiques, et propres à l'offre de transport. Nous discutons des estimations de la valeur du temps pour le déplacement domicile-travail, sa sensibilité par rapport à la durée et le coût du trajet. Elles sont pour la plupart conformes aux valeurs retenues par les institutions publiques et opérateurs de transports de la région francilienne.

Le dernier chapitre remet en cause la certitude environnementale dans laquelle l'individu prend ses décisions. Dans un environnement risqué, la théorie de l'utilité espérée dépendante du rang est adaptée à l'étude des choix de transport, le temps de trajet étant une variable aléatoire probabilisée ex ante à la prise de décision. Les notions d'optimisme et pessimisme dans le risque interviennent dans le processus de choix du décideur. Le contexte d'analyse est facilité dans la mesure où le temps de transport est toujours considéré comme une perte de ressources pour l'individu. Structurellement, le concept de valeur du temps prend corps dans un environnement certain. La prime de couverture peut être interprétée comme un indice de performance de l'offre de fiabilité, régularité et ponctualité. La définition d'une prime de couverture contre la perte de temps relativement à une distribution de probabilité cible est discutée et analysée. Ces valeurs s'interprète comme des indicateurs de la fiabilité et la performance d'une offre de durée sur un trajet considéré. Elles fournissent une mesure monétaire de la régularité de l'offre relativement aux dispositions contractuelles, c'est-à-dire la (les) distributions des temps de trajet prévue(s) dans le contrat de voyage. Leur sensibilité dépend de l'attitude face au risque du décideur. Parmi de nombreux exemples, les primes pour s'assurer une durée avec certitude,

aussi appelées équivalents certains, mais aussi les primes pour se couvrir contre une réalisation de la durée du trajet supérieure à celle qui est prévue. Un exemple concernant la demande d'itinéraires aériens sur un corridor origine-destination prédéterminé est proposé. Optimisme et faible aversion au risque de perte de ressources en temps dans le transport est le résultat de la description du comportement du passager se déplaçant pour motifs professionnels.

La conclusion générale propose une synthèse des cinq chapitres et les limites de nos approches, à partir desquelles nous mettons en avant les avancées récentes de la modélisation de la demande de transport et les nouveaux champs de recherche qu'elles ouvrent. Dans notre cadre, chaque modèle présenté est restreint à l'analyse d'un aspect marginal de la demande de transport pour un motif donné. Nous ne modélisons pas explicitement toutes ses composantes. De fait, les optima du consommateur pour celles ignorées reposent sur certaines règles heuristiques communément admises, sans pour autant s'avérer vérifiées. Dans la continuité de la remarque précédente, nous soulignons l'extension et la généralisation de plus en plus évidente des systèmes de prévision à court terme de la demande de transport fondés sur l'analyse de calendriers d'activités. Adaptés à l'étude des comportements de mobilité des individus en milieu urbain, ils permettent l'étude précise de nombreuses politiques de développement urbain à un niveau local, puisqu'ils capturent les effets sur toutes les demandes d'activités lors d'une modification marginale de la planification de l'une d'entre elles. Depuis peu, la prise en compte de variables explicatives latentes dans le processus décisionnel du voyageur autorise à s'éloigner du seul concept d'efficacité de l'allocation des ressources. L'endogénéisation des demandes de caractéristiques qualitatives des options de choix établit d'autres types de règles de décision que la simple maximisation de l'utilité. Dans le domaine des transports, la recherche de sécurité, de confort, de commodité d'utilisation d'un moyen de déplacement complète l'analyse de l'efficacité allocative des ressources en introduisant des phénomènes plus subjectifs dépassant les seules considérations de temps et coût dans l'utilisation d'un contrat de transport. D'autres limites seront discutées en conclusion.

Chapitre 1

Les facteurs constitutifs de la demande individuelle de transport.

Introduction.

D'un point de vue spatial, dans chaque zone géographique circonscrite se superposent couches résidentielles, commerciales et industrielles. Le découpage d'un espace en une mosaïque de zones relève pour notre cadre d'analyse d'une nomenclature administrative définie par les institutions publiques compétentes du territoire sur lequel il est situé. Cette nomenclature définit une stratification hiérarchisée dans l'espace, de la plus petite unité d'observation à la plus grande, de différents types de zones administratives. Pour chacune d'entre elle, le choix de la répartition spatiale des résidences, commerces et industries n'est pas irréfléchi. Il cherche à organiser, répartir, exploiter et rentabiliser au mieux les ressources disponibles sous les contraintes topographiques imposées naturellement par la zone géographique. Le plan d'occupation des sols associé et son évolution s'appuient sur ces objectifs. Les intensités des trois facteurs constitutifs de l'occupation et l'exploitation d'une zone géographique par une population d'individus conditionnent la dynamique de l'activité économique au niveau local. Ces propos suggèrent la circulation des ressources et besoins entre les différentes localisations desquelles émanent diverse offres et demandes spécialisées de facteurs de production. La notion d'accessibilité, sous-jacent le degré de fluidité de la circulation sur les réseaux de transports, apparaît centrale dans la mesure où elle conditionne le degré de mobilité de tous les types de

ressources et besoins. L'existence de réseaux de transport assure ces nécessités de déplacements.

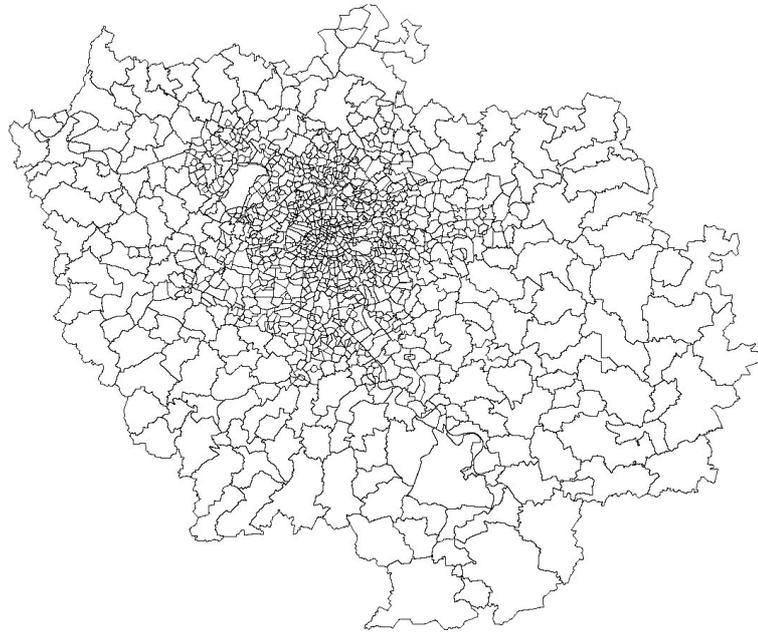


FIG. 1-1 – Zonage Ile-de-France, Shéma de la direction générale de l'équipement

Nous nous intéressons à la demande de transport émanant d'un individu, et de son ménage, résidant et effectuant ses activités régulières dans une région donnée. Le cycle d'activité sera fixé sans perte de généralité à la journée. Nous garderons à l'esprit la recherche de compréhension dans les cycles d'activités durant les journées ouvrables. Cette précision permet de postuler une certaine reproductibilité du cycle quotidien pour la plupart des individus, en excluant les congés hebdomadaires autorisant une trop grande hétérogénéité et variabilité des cycles d'activités. Nous attendons d'un individu une certaine régularité dans les choix de ses déplacements. Naturellement, se déplacer force au minimum l'allocation de ressources temporelles, et souvent aussi budgétaires. Tenter de répondre aux questions pourquoi, où, comment, quand, combien, comment, quoi relative à cette problématique de demande de transport nous impose de retenir les éléments suivants pour celle-ci : les points fixes de l'espace de l'individu, en particulier la localisation résidentielle de son ménage ; le nombre de véhicules possédés par le ménage, les fréquences de voyages pour tous ses motifs de déplacement, les destinations visitées, les modes de transport utilisés,

les horaires et les itinéraires de ses déplacements.

Les mouvements de population dans un espace géographique sont plus organisés qu'ils n'y paraissent. Ils sont définis par l'agrégation des déplacements de tous les individus composant la population y circulant. L'importance de savoir organiser, réguler, et prévoir la répartition spatiale des demandes d'activités et les demandes de transport en résultant est de premier plan. Nous discutons dans ce chapitre les facteurs réguliers dont les interactions conduisent chaque individu à formuler ces demandes. A long terme, les décisions d'investissement en résidence et capital automobile conditionnent les possibilités d'organisation spatiales et temporelles des activités et déplacements. Selon ses caractéristiques socio-démographiques et économiques, un ménage choisira où se localiser et combien de véhicule automobile il doit pouvoir utiliser. A court terme, chacun de ses membres exprime des niveaux de demandes pour des activités. Il doit alors les organiser dans le temps et l'espace en recourant au marché des transports. Nous présentons et analysons ici les mécanismes de formation de ces demandes.

1.1 Décisions de long terme : localisation résidentielle et capital automobile.

Cerda (1867) énonce que l'urbanisme est la pratique sociale qui cherche à fonder sur un discours théorique scientifique la construction d'un ordre spatial urbain adapté aux changements économiques et technologiques d'une société donnée. Elle cherche à organiser, répartir, exploiter et rentabiliser au mieux les ressources disponibles sous les contraintes topographiques imposées naturellement par la zone géographique dans laquelle elle se sédentarise. En particulier, le choix de zones résidentielles diversifiées adaptées à l'hétérogénéité socio-économique et démographique de la population. Nous devons mieux comprendre comment se forme cette offre et dans quelle mesure les caractéristiques des ménages résidents y jouent un rôle prédominant, notamment la distribution de leurs revenus. Le choix de la localisation initiale de ces zones dans la région relève aussi de l'organisation spatiale industrielle et commerciale de la région. Le développement économique local engendre l'accroissement de la demande globale de travail et accroît l'attractivité de la zone géographique, générant plusieurs formes d'agglomération urbaine. Elle impose aussi l'évolution des systèmes de transport puisque, à capacités finies, l'accroissement dé-

mographique engendre en général congestion et perte de ressources en temps dans les déplacements : les coûts de transport des institutions, firmes et ménages augmentent, et l'attractivité de la zone diminue. Cette expansion économique cause aussi une expansion géographique, ou phénomène d'agglomération urbaine, ou au moins une intensification dans certains points de l'espace, des zones commerciales, industrielles et résidentielles.

La dépendance de la mobilité d'un individu à l'automobile force à comprendre dans quelle mesure sa possession influe sur les habitudes de déplacements, mais aussi sur le choix du lieu d'une résidence, et encore sur les niveaux de demandes d'activités. La flexibilité qu'elle autorise, surtout dans l'organisation horaire des activités, offre un bien-être supplémentaire à l'individu. L'usage collectif de l'automobile en milieu urbain génère en contrepartie de nombreuses externalités négatives, notamment congestion routière et pollution atmosphérique. Au niveau du ménage, le partage de cette ressource peut apparaître conflictuel en présence de contraintes de capacité. Ces faits en forcent la compréhension et l'analyse.

1.1.1 Offre immobilière et valeur d'un logement.

Lorsque nous souhaitons comprendre les causes du choix d'une localisation résidentielle et de ses caractéristiques, nous ne pouvons échapper à l'analyse de la valeur d'un logement, c'est-à-dire à la formation des niveaux de prix sur le marché des différents types d'habitats. Etant donné l'hétérogénéité des facteurs conditionnant les niveaux des prix, nous partirons du postulat suivant : un logement est un service composé de plusieurs caractéristiques intrinsèques et s'insérant dans un espace lui aussi composé de plusieurs caractéristiques, et sa valeur est définie comme la somme des flux actualisés de la production anticipée de services et bien-être futurs qu'il fournit conjointement avec son espace de proximité pour le ménage souhaitant y résider. Notre formulation considère trois canaux pour cette valorisation d'un logement : l'actualisation des flux futurs est dépendante de la courbe des taux d'intérêt à termes ; la production de services futurs anticipés reste un concept flou autorisant une large marge de manoeuvre dans sa description ; la notion de proximité spatiale est dépendante de l'offre de réseaux de transport.

Dans un contexte de taux long bas, les barrières à l'entrée s'abaissent sur le marché du crédit immobilier, permettant aux ménages à faibles niveaux de revenus d'y avoir accès : cet accroissement de demande, pour des quantités données de lo-

gements de différents types, entraîne une augmentation du niveau des prix courants permettant de rééquilibrer le marché immobilier par une éviction des ménages les plus pauvres. Une baisse des taux d'intérêt à long terme a un double impact sur le comportement d'épargne du ménage et engendre un effet total indéterminé : un effet substitution favorisant une augmentation du niveau de consommation à court terme, et un effet revenu favorisant la reconstitution d'encaisses monétaires par une augmentation du niveau d'épargne à court terme. En termes de comportement d'investisseur, une baisse des taux d'intérêt à long terme favorise l'accès d'un ménage au marché du crédit immobilier. Nous soulignons cependant qu'il doit être suffisamment faible pour que celui-ci considère que le rendement de l'investissement résidentiel est plus élevé que le rendement associé à la reconstitution de son pouvoir d'achat. L'augmentation de l'efficacité marginale de l'investissement provoque un accroissement de la valeur actuelle du bien-être qu'il peut fournir au cours du temps et favorise l'augmentation de la demande de logement. Les désajustements entre offre et demande de logements en milieu urbain ont des effets différenciés sur les niveaux de prix. La pression exercée sur l'augmentation des prix dans un contexte d'excès de demande se révèle à l'observation plus importante que celle exercée sur la baisse des prix dans un contexte d'excès d'offre. Un excès de demande entraîne une augmentation presque instantanée des niveaux des prix, alors qu'un excès d'offre ne fait diminuer les prix qu'à plus long terme, c'est-à-dire lorsque la désertification progressive en termes industriels et commerciaux de la zone est avérée : les prix de l'immobilier sont corrélés au niveau local de croissance économique. Un ralentissement de celle-ci entraîne un ralentissement de la hausse des prix, et une phase de récession engendre une baisse des prix de l'immobilier. L'effet est plus lent dans ce dernier cas car l'observation du désajustement de l'offre résidentielle aux caractéristiques socio-démographiques des ménages dont les compétences sont adaptées aux demandes de travail des industries et commerces est plus difficile. Le délai d'ajustement nécessaire aux rééquilibrages des marchés de la région géographique est plus long.

Les métiers de l'urbanisme interviennent dans la génération de types de logements et de l'offre de caractéristiques y étant associée. Selon la morphologie du plan d'occupation des sols, la coexistence de différents types de logements en une même localisation n'est pas assurée. Soulignons que le choix de cette offre explicite les orientations politiques concernant la distribution des caractéristiques socio-démographiques de la population pouvant y résider et le développement des industries et commerces adaptés. La production de services futurs anticipés conditionne les niveaux de bien-

être anticipés : le prix d'un logement dépend de son type et des caractéristiques qu'il propose. La distinction entre appartement, maison collective, et maison individuelle est évidente et couramment pratiquée. Les caractéristiques intrinsèques descriptives d'un logement sont multiples, certaines étant particulièrement remarquables, par exemple la surface habitable, le nombre de pièces, la surface du terrain pour les maisons, le(s) type(s) d'approvisionnement en énergie et eau, l'ancienneté et l'état des structures et matériaux de la construction. Ces attributs causent partiellement l'intérêt que porte un ménage de caractéristiques socio-économiques données. Inconditionnellement, plus les niveaux de confort et convenance d'un logement sont élevés, plus la demande pour ce type sera grande : le niveau de son prix augmente. Ce mécanisme est à relativiser selon l'environnement de proximité du logement. Selon l'aisance à accéder avec facilité à des biens et services diversifiés à partir du domicile, les précédents effets de leviers plus ou moins appuyés.

Les prix du marché de l'immobilier sont une fonction croissante du degré de mobilité qu'offre la zone dans laquelle les logements se trouvent : pour un même type de logement, nous observons un différentiel de prix en faveur de celui qui est localisé dans la zone où les réseaux de transport sont le plus développés. Les prix immobiliers seront d'autant plus rigides à la baisse qu'ils concernent des logements situés en un milieu urbain où les réseaux de transport sont variés et densément maillés. Les capacités et l'efficacité des réseaux de transport entretiennent l'attractivité de la zone en termes résidentiels, industriels et commerciaux, par de faibles coûts de transport. A long terme, si les infrastructures de transport ne s'adaptent pas, la saturation des capacités d'absorption des flux par les réseaux de transport engendre congestion, elle-même impliquant un certain nombre d'externalités négatives au niveau macro-économique : l'allongement des temps de trajet des individus cause une perte globale de ressource en temps qui pourrait être allouée à d'autres activités plus productives ; le ralentissement de la vitesse de circulation cause au niveau environnemental un accroissement des gaz polluants ; pour les firmes, les coûts d'approvisionnement et distribution augmentent. Il faut pouvoir bénéficier à long terme d'un aménagement des infrastructures de transport pour escompter un accroissement de l'activité économique au sein de la zone géographique et un entretien de l'attractivité résidentielle de la région géographique. Ces effets environnementaux, longtemps négligés, ont un impact sur la demande résidentielle¹. Ils sont de plus en plus considérés dans les

¹Historiquement, surtout depuis la révolution industrielle, et à cause des vents dominants, les quartiers les plus valorisés se sont développés à l'ouest des villes. Sauf géographie discriminante,

plans d'aménagement urbain, s'avérant vérifié la dégradation du niveau de bien-être par la dégradation de la qualité de l'environnement. Le concept relativement récent de développement durable en milieu urbain traduit les besoins environnementaux des ménages souhaitant s'y installer ou continuer à y résider. À terme, oublier de considérer cette composante conduit à une pression à la baisse des prix des logements qui subissent ces externalités négatives.

Le marché de l'immobilier ne peut s'adapter au rythme des besoins conjoncturels. Lorsqu'une décision de résider en un lieu doit être prise, c'est aux conditions du marché du moment qu'elle est prise. L'offre de logement est considérée comme donnée : la répartition spatiale des types de logements est donnée. Nous comprenons lorsque le ménage est preneur de prix sur le marché immobilier et le marché du crédit, outre son niveau de revenu comme variable déterminante de son choix de localisation résidentielle, d'autres caractéristiques lui étant propres interviennent.

1.1.2 Structure du ménage et choix résidentiel.

Pour notre cadre d'analyse l'unité d'observation est l'individu, mais le choix d'un lieu de résidence est une problématique dont la solution s'établit au niveau du ménage dans lequel il vit. Aujourd'hui encore, les ménages allouent une grande partie de leurs ressources en temps à des activités ayant lieu à domicile. De fait, la résidence elle-même et son environnement proche jouent un rôle important dans le niveau de bien-être général du ménage y résidant. Le choix des caractéristiques d'un logement et sa localisation spatiale, déterminant son insertion dans le paysage urbain où se superposent couches résidentielles, industrielles et commerciales, toutes hétérogènes et non uniformément réparties dans l'espace, est une décision d'investissement durable, qu'il s'agisse d'accès à la propriété ou la location. Plusieurs types de déterminants causent la décision associée à cette problématique de choix. Certains sont à la source des préférences du ménage, et relèvent des caractéristiques sociales, démographiques et économiques de chacun de ses membres, notamment du niveau de revenu pouvant constituer une barrière à l'entrée sur certains types de logements et/ou zones résidentielles. D'autres relèvent des mécanismes de marché quant à la valorisation monétaire des logements et les caractéristiques spatiales du plan d'aménagement urbain. Le degré de variété des services accessibles à proximité joue un rôle significatif sur la valeur de la zone géographique elle-même, quel

c'est une observation encore faite aujourd'hui.

que soit le type de logement : la diversification des activités offertes engendre une augmentation des prix des logements. Les caractéristiques intrinsèques des types de logements relativisent ces effets. Finalement, sous-jacentes à la notion de proximité, l'efficacité et la diversité de réseaux de transport accessibles à cette localisation résidentielle détermine l'ampleur et l'aisance de la mobilité du ménage. La confrontation de l'ensemble de ces déterminants détermine l'ensemble des possibles parmi lequel le ménage effectue son arbitrage.

Si un ménage a certains souhaits et besoins résultant de ses caractéristiques sociales et civiles, il doit aussi composer avec ses contraintes budgétaires, pouvant jouer le rôle de barrières à l'entrée sur certaines zones résidentielles et certains types de logements. Son revenu est un facteur central dans son choix effectif : il détermine l'ensemble des restrictions auxquelles doit se soumettre le ménage dans son choix. Notamment, l'ensemble des choix possible se restreint de plus en plus à mesure que le niveau de revenu diminue. Les conséquences sont multiples, et dépendant du plan d'aménagement urbain, peut apparaître des phénomènes de ségrégation spatiale des ménages à bas revenu. Les prix de l'immobilier d'une localisation étant fonction croissante du degré de diversité des activités y étant offertes, les ménages à bas niveau de revenu sont contraints à s'excentrer de celles-ci sans aide institutionnelle. Croiser cet effet avec la répartition spatiale des types de logements peut faire apparaître des phénomènes de concentration spatiale de classes de revenu en certaines zones de la région.

Le cycle de vie et la structure sociale jouent un rôle central dans la formation des préférences résidentielles du ménage. McFadden (1978), souligne le fait qu'un actif vivant seul cherche en général à (re)localiser sa résidence suivant la signature d'un contrat de travail, fixant, outre la quantité horaire et le salaire, les conditions calendaires et spatiales de sa réalisation. L'accessibilité de la zone de travail à partir du point d'origine est prédominant, s'agissant de l'activité principale d'un individu, c'est-à-dire de celle autour de laquelle le reste des activités (mandataires, secondaires et somptuaires) s'organisent. Le nombre de membres actifs, c'est-à-dire dont l'activité primaire est le travail peut imposer un processus de négociation dans la recherche d'une localisation spatiale de la résidence principale. Deux membres actifs dans un ménage introduit une hétérogénéité des préférences individuelles pouvant conduire à une divergence dans les choix acceptables par chacun d'entre eux. Dans ce contexte, la localisation résidentielle résulte d'un processus de négociation collective permettant la mise en place d'un compromis qui, s'il ne permet pas à chaque indi-

vidu d'atteindre sa cible en terme de bien-être, permet au ménage de se partager de façon raisonnée le coût induit par l'hétérogénéité des préférences. Il existe d'autres structures de ménage dont les membres ne sont pas actifs, étudiants et retraités par exemple. Leur problématique de choix de localisation résidentielle n'est pas fondée sur la même hiérarchie des activités principales à réaliser, leurs cycle de vie étant différents. Il faut comprendre qu'en présence d'un ménage dont la structure sociale est telle que plusieurs membres ont différents besoins primaires, la solution à la problématique de localisation de la résidence résulte d'une composition des besoins élémentaires de chacun dans l'espace et le temps : l'accessibilité aux destinations principales doit être assurée de façon à ce que les ressources totales du ménages soient allouées de façon à ce que tous puissent en bénéficier au mieux, et qu'un objectif de bien-être collectif soit assuré.

D'autres caractéristiques du ménage influencent son choix résidentiel. La taille du ménage incite à choisir un logement dont l'espace est suffisant. La présence d'enfants à charge conditionne le besoin d'infrastructures (crèches, écoles, lycées, universités,...) adaptées et aisément accessibles. D'autres activités mandataires sont à considérer, et obligent d'être aussi regardant et exigeant sur l'accessibilité au zones commerciales, aux services publics, aux infrastructures de santé et d'éducation. Les activités secondaires et somptuaires sont aussi des éléments de la consommation totale de l'individu devant être considérées. Celles-ci dépendent étroitement des ses caractéristiques : un individu souhaitant avoir accès à de nombreux services spécialisés tend à se localiser auprès d'un centre urbain. Plus généralement, un individu souhaitant avoir accès à une large variété de services spécialisés tend à localiser sa résidence de façon à pouvoir y accéder régulièrement et à faibles coûts budgétaires et temporels. Accessibilité? Nous pouvons tenter de définir ce concept par la facilité à se mouvoir dans l'espace à partir d'une origine et jusqu'à une ou plusieurs destinations pour y réaliser un ensemble de motifs donnés.

Pour une répartition spatiale d'une population de ménages de différents types donnés dans les différentes localisations possibles de la zone géographique d'intérêt, celles-ci émettent au niveau agrégé des flux de voyageurs vers d'autres destinations. Le ménage localisé en un point va produire les déplacements nécessaires à la réalisation des paniers d'activités de ses membres. Cette production de déplacements est dépendante d'un autre type d'investissement durable : l'accumulation de capital automobile. La possession de véhicules motorisés, principalement une ou plusieurs voitures, conditionne fortement le niveau des fréquences des déplacements générés

par le processus de production des voyages du ménage. Etant donnés l'importance des coûts liés à la localisation résidentielle et ceux liés à l'acquisition de véhicules motorisés, étant donné qu'il existe une relation inverse entre prix de l'immobilier et accessibilité géographique, il existe un arbitrage entre le fait de se localiser en centre urbain sans avoir à entretenir un capital automobile élevé et le fait de s'excentrer des zones d'activités en compensant la perte d'accessibilité par l'acquisition de nouveaux véhicules. Dans le premier cas, le prix du logement est plus élevé mais les coûts de transport plus faible ; dans la seconde situation, le coût de logement est relativement moins important et le coût de transport plus élevé.

1.1.3 Investissements en capital automobile.

Cette production de déplacement dépend d'une autre décision d'investissement durable faite par les ménages : le niveau de capital automobile. Il existe un arbitrage évident en termes budgétaires et temporels entre le coût de la localisation résidentielle et le coût généralisé de transport : certains ménages préféreront s'excentrer des zones à fortes densités commerciales, industrielles, touristiques afin de bénéficier d'un coût d'accès au logement modéré, mais cette perte d'accessibilité aux destinations d'intérêt engendre une augmentation des coûts et durées de transport, qui à son tour engendre une perte de bien-être puisque perte de ressources budgétaires et temporelles qui aurait pu être allouées à d'autres activités plus profitables. D'autres, toutes choses égales par ailleurs, préféreront se localiser au sein de zones où les prix immobiliers sont plus élevés, mais où les coûts de transport sont plus faibles car la diversité et la proximité des activités réalisables permet d'éviter d'allouer des ressources budgétaires et temporelles trop conséquentes à l'activité transport. Il est entendu que la marge de manoeuvre dans cet arbitrage reste étroitement liée aux caractéristiques de revenu du ménage, les plus pauvres étant contraint à s'excentrer des zones fortement diversifiées d'activités s'il ne bénéficient d'aucune aide sociale institutionnelle. Il faut noter que le revenu joue aussi le rôle de barrière à l'acquisition d'une automobile, appuyant la perte d'accessibilité dans les enclaves résidentielles pour ménages à faibles revenus.

La possession pour usage individuel d'une automobile permet de bénéficier de la plus grande des flexibilités dans l'organisation spatiale et calendaire des activités primaires, mandataires, et secondaires souhaitant être réalisée par l'individu, mais impose aussi un coût budgétaire conséquent, somme d'un coût fixe à l'acquisition

et variable à l'exploitation du véhicule. L'existence de contraintes de capacité sur le niveau du capital automobile incite à l'acquisition de nouveaux véhicules si la valeur du bien-être supplémentaire qu'ils engendrent pour le ménage est supérieure au coût de leur acquisition, entretien, et utilisation. Soulignons que l'existence de ces contraintes incite aussi au développement du covoiturage et à l'utilisation de modes de transport alternatifs à l'automobile. En toutes circonstances, la présence de telles contraintes génère un coût supplémentaire au niveau du ménage, notamment en termes d'allocations de ressources en temps à l'activité de transport. Chaque ménage possède un capital automobile, c'est-à-dire un certain nombre de véhicules, zéro étant une possibilité. Ce capital peut être considéré comme résultant d'un processus de choix à long terme au niveau du ménage. Celui-ci cause pour chacun de ses membres la situation de choix concernant son mode de transport pour son déplacement domicile-travail. Lorsqu'il y a au moins une automobile par travailleur, il n'y a aucune contrainte de capacité, et aucun des membres ne se voit restreint dans ses moyens de déplacement. Ce n'est pas le cas lorsque le nombre de véhicule par travailleur est strictement inférieur à un. Dans ce cas, il existe une contrainte collective de partage du capital motorisé. Plusieurs déterminants entrent en jeu dans cette allocation conduisant au moins un des membres du ménage à se restreindre à un ensemble de choix de modes de transport plus limité. Dans les modèles initiaux de fixation du niveau du capital automobile, voir Johnson (1975) et Burns and Golob (1975), les caractéristiques du ménage tel que son niveau de revenu, sa taille, sa localisation résidentielle relativement à l'espace géographique des activités que réalisent ses membres, leurs fréquences de déplacements sont considérés. L'influence de ces variables est intuitive : l'acquisition, l'utilisation et l'entretien d'une automobile supplémentaire présuppose la constitution d'un capital financier suffisant, du moins la possibilité de pouvoir faire face à un échéancier de dépenses y étant associé. De fait, les ménages à faible niveau de revenu subissent une contrainte plus importante. Aussi, il peut exister un effet taille du ménage, engendrant une démultiplication du nombre des activités primaires, mandataires et secondaires qu'il réalise, donc naturellement plus de déplacements, incitant à l'acquisition de nouveaux véhicules. Finalement, selon les caractéristiques des trajets à réaliser pour les activités primaires et mandataires des différents membres, l'acquisition d'un véhicule supplémentaire peut constituer un abaissement des pertes de ressources en temps du ménage de façon à exploiter ce gain à d'autres activités plus productives. Au niveau de chacun des membres du ménage, en présence de contraintes de capacité se joue

un jeu de négociation pour le partage de la ressource limitée, où chaque travailleur a ses propres arguments. Comme résultat, l'un d'entre eux sera contraint dans le choix de son mode de transport.

La fréquence des déplacements sous-jacents au souhait de réaliser un panier d'activités donné joue aussi un rôle prédominant dans l'acquisition d'un véhicule. Outre le besoin et/ou le désir de réaliser plusieurs activités en plusieurs destinations, elle dépend étroitement de l'accessibilité à celles possibles et à l'efficacité des réseaux de transport permettant le transit. Un individu sera tenté de regrouper ses déplacements associés à la réalisation du calendrier de ses activités en tournées permettant de minimiser l'usage des réseaux de transport lorsque ceux-ci sont congestionnés, mal adaptés. La localisation résidentielle d'un ménage conditionne les besoins en déplacement de ses membres pour effectuer leurs calendriers d'activités définis dans l'espace et le temps. Une fois celle-ci établie, chacun d'entre eux se livre à un ensemble d'activités soit collectivement, soit individuellement. De façon générale, chacun constitue un panier d'activités qu'il souhaite et/ou doit réaliser au cours d'un cycle temporel donné (en général la journée). Déjà souligné, la répartition spatiale des activités n'est pas uniforme, et impose à l'individu de sélectionner un ensemble de destinations associées à ses besoins. Selon la quantité d'activités qu'il souhaite effectuer déterminant la quantité de destinations auxquelles il doit se rendre, celles-ci dépendant de sa localisation résidentielle, l'organisation des trajets nécessaires va déterminer le nombre de voyages que va réaliser l'individu, c'est-à-dire sa fréquence de déplacement. Disposer d'une automobile permet d'accroître son niveau par l'apport de flexibilité dans l'organisation des déplacements.

1.2 Demande d'activités à court terme et choix de destinations.

L'analyse des interrelations entre activité économique et transports peut être effectuée à plusieurs niveaux : au niveau microéconomique, il s'agit de comprendre comment et pourquoi les ménages et firmes se localisent en un point spécifique ; au niveau macroéconomique, il s'agit de comprendre dans quelles mesures la dynamique de l'activité économique d'une région est conditionnée par ses réseaux de transport. Il n'est pas physiquement possible de pouvoir avoir accès en un unique endroit à toutes les activités que nous pourrions désirer consommer. La nécessité

de se déplacer est un fait, mais reste conditionnée par le désir de réaliser une ou plusieurs activités. Nous pensons qu'il est raisonnable de supposer que la consommation d'activité de transport pour elle-même n'existe pas pour le consommateur rationnel souhaitant allouer au mieux les ressources dont il dispose. Se déplacer est une activité intermédiaire intrinsèquement peu utile au consommateur : seul le motif à destination est important. L'objet d'un déplacement est dans notre contexte la satisfaction de demandes pour des activités permettant de répondre à différents besoins élémentaires. L'analyse des choix de destinations relève des notions d'accessibilité et attractivité de celles-ci. Le choix d'un ensemble de destinations est dépendant de l'organisation spatiale des zones d'activités (industrielles et commerciales) au sein de la région dans laquelle réside le décideur. L'attractivité d'une zone relève directement des conditions de marché associée à l'activité (ou aux activités) devant être réalisées à ces destinations. L'accessibilité d'une zone est associée au marché des transports permettant de se rendre à cette destination : sa localisation et son insertion au sein des réseaux de transport joue un rôle primordial dans la détermination de son pouvoir de monopole spatial.

Pour qu'une destination puisse accroître son pouvoir de monopole spatial, elle doit accroître son attractivité. Cette dernière notion transite par deux sources. La première est celui de l'accessibilité géographique : plus les capacités d'absorption des flux de voyageurs est importante, et plus la concurrence entre opérateurs de transport est importante, moins les coûts de transport associés à un déplacement jusqu'à cette zone seront importants. Alors, les ressources et temporelle du consommateur restant après l'allocation nécessaire à l'activité de transport vont augmenter. Toutes choses égales par ailleurs, le bien-être de l'individu s'accroît. Cette idée est intuitive, car moins le déplacement est ressenti comme une contrainte physique et économique, plus le désir de mobilité est grand. La seconde source concerne les firmes offrant la/les activités sur place. Le raisonnement est simple : si les coûts de transport sont faibles, alors les coûts d'approvisionnement et distribution entrant dans le coût total sont peu grevés par la nécessité de transporter les inputs et outputs servant à la production et transformation dans le cycle d'activité économique. Dès lors, toutes choses égales par ailleurs, c'est-à-dire relativement aux autres zones, le profit des firmes présentes dans la zone s'accroît si le marché des transport y étant associé dispose de grosses capacités d'absorption des flux et/ou tend vers une structure très concurrentielle. Dans le cas où capacités d'absorption suffisantes et faible concurrence coexiste, il y a nécessité de s'assurer que l'oligopole présent sur le marché

des transports de voyageurs ne profite pas de son pouvoir de négociation pour pratiquer une tarification défavorable au développement économique local. La situation où capacités d'absorption insuffisantes et forte concurrence coexistent, les conditions d'accès à la zone géographique ne constitue pas une barrière au déplacement mais la forte attractivité de la zone induit une demande totale de trajet conduisant à une saturation des réseaux d'accès, donc une dégradation des ressources des voyageurs. Lorsque les firmes présentes dans une zone profitent de son attractivité induite par un marché des transports associé définissant des conditions d'accès grevant faiblement les ressources budgétaires et temporelles des agents économiques, elles ont la responsabilité de répartir la valeur ajoutée engendrée par le fort pouvoir de monopole spatial que leur procure la zone. Elles doivent redistribuer la valeur ajoutée, engendrée par une accessibilité plus grande relativement aux autres zones : elles peuvent la conserver dans leurs profits, la redistribuer aux consommateurs par une diminution de leurs prix, et aussi la redistribuer en partie au marché des transports afin d'assurer une adaptation des capacités à la demande de flux entrants et sortants. Le choix de cette redistribution est de nature politique, mais conditionne fortement la façon dont est envisagé le développement à long terme de cette zone. L'impact des évolutions législatives de ces dernières années, coopération intercommunale, aménagement du territoire, planification urbaine, doit être considéré, car il a modifié sensiblement les outils et les rôles des différents acteurs économiques, en amenant au premier plan la gestion de la mobilité : plans de déplacement urbains, décentralisation des transports régionaux de voyageurs, extension des attributions des autorités organisatrices de transports urbains.

Pour comprendre les choix à court terme des destinations envisagée par une population de voyageurs, il faut comprendre le pourquoi et le comment du processus de long terme de localisation spatiale des offres associées. En explicitant, en dehors des contraintes légales et administratives, le pourquoi de la répartition spatiale d'un ensemble d'offres d'activités deux à deux substituables ou complémentaires, nous pouvons mieux comprendre les mécanismes pesant sur les différents types de concurrences et coopérations entre des firmes produisant des biens et services diversifiés, donc les mécanismes de fixation des niveaux des prix sur les différents marchés des activités, la répartition spatiale de la population étant donnée, c'est-à-dire à niveaux de demandes donnés pour toutes les zones géographiques de la région. Dans nos propos, la dynamique du processus d'agglomération résidentielle, commerciale et industrielles ne suit pas une logique anarchique : indépendamment du lieu où il

prend forme et indépendamment de la population y contribuant, certains concepts géo-économiques sont récurrents.

A court terme, nous supposons les caractéristiques de l'offre données. Les firmes ont des localisations invariantes au cours de la période durant laquelle le consommateur établit son panier d'activités. La concurrence, au sens large, entre les firmes engendre un ensemble de grilles d'offres caractérisant tous les mécanismes de différenciation des contenus des biens et services sur tous les marchés des activités, ainsi que les prix y étant associés. Ces grilles d'offres sont réparties dans l'espace géographique, déterminant l'ensemble des lieux où le consommateur peut réaliser différents types d'activités, chaque endroit possédant ses propres caractéristiques d'offre diversifiée. Seul pour quelques motifs d'activités, la faiblesse de la concurrence de l'offre sur les différents types de biens et services correspondant conduit à une situation de monopole ou oligopole spatial au niveau régional. Nous soulignons que dans un environnement fortement urbanisé cette situation s'efface. Pour un type donné de biens et services, l'entretien de cette concurrence entre les firmes les produisant est partiellement entretenue par l'efficacité des réseaux de transport.

1.2.1 Agglomération spatiale et activité économique.

Pour mieux comprendre comment se forme le choix de destination des ménages, il faut commencer par comprendre comment se localise une offre diversifiée de biens et services. Les entreprises se localisent là où elles espèrent trouver des marchés variés et larges, dans le but de bénéficier d'une plus grande flexibilité dans l'adaptation de leurs besoins au cours du temps. Des réseaux de transport efficaces engendrent un certain nombre d'externalités positives, telles l'amélioration de la diffusion de l'information et du progrès technique pour les firmes par la diminution des coûts de distribution, l'amélioration de l'appariement de leurs besoins par la présence d'une aire de marchés plus diversifiée et large diminuant les coûts d'approvisionnement, et conduisent à l'agglomération spatiales des différents types d'activités. Ils entretiennent la diversification et la profondeur des marchés des activités. La théorie microéconomique classique donne au transport un rôle crucial dans le processus de localisation d'une firme donnée. Le résultat fondamental du modèle précurseur de la ville linéaire d'Hotteling(1929) est tel que si deux firmes produisant le même bien se rapprochent l'une de l'autre dans l'espace, elles augmentent leur aire de marché, mais accroissent aussi leur degré de concurrence en prix : ces interactions stratégiques

conduisent à une baisse des prix à la consommation. En présence d'une dimension spatiale, chaque firme dispose d'un pouvoir de monopole en son voisinage en raison de la protection procurée par le coût de transport. Si ce cadre élémentaire permet de mettre en évidence un résultat élégant et intuitif, les conditions de sa réalisation sont peu réalistes : outre la répartition linéaire des firmes, la constance des rendements d'échelle, l'absence d'externalités, et la connaissance de la répartition spatiale des niveaux de demandes sont aussi supposées être satisfaites. Cette dernière condition reste acceptable dans une approche de court terme, dans la mesure où la dynamique de la mobilité résidentielle est un processus de long terme. De nombreuses extensions ont été et sont encore proposées, notamment par Thisse(1988,1993,1995,1997).

Le pouvoir de monopole spatial dépend étroitement de la façon dont la demande perçoit les coûts de transport. Nous préférons caractériser ce coût de transport par la durée en milieu urbain, la simple mesure de distance n'étant plus révélatrice des découragements au déplacement en présence de congestion. La connaissance de la perception du temps par la demande est un élément central pour le problème de localisation d'une firme relativement à ses concurrents. Elle sait qu'elle peut s'assurer un pouvoir de monopole spatial par l'existence de coûts de transport. Elle sait aussi que ce pouvoir diminue à mesure que la demande est éloignée, c'est-à-dire que l'individu doit allouer de plus en plus de temps de transport pour y accéder. A supposer que la demande ne soit pas concentrée en un unique point de l'espace, elle a un intérêt certain à ne pas se situer au mêmes endroits que ses concurrents. Plus encore, plus le coût de transport subi par la demande croît avec la durée du trajet, la fonction de coût est alors convexe, plus elle aura intérêt à s'éloigner de ses concurrents pour asseoir son pouvoir de monopole spatial sur son aire de marché. Thisse(1993) précise l'impact de ce coût de transport sur les problèmes de localisation des firmes : puisque le coût de transport est un découragement à se déplacer pour le consommateur, les firmes chercheront à être localisées au plus près des noeuds des réseaux de transports, permettant ainsi d'étendre le pouvoir de capture du marché total régional. L'observation de cette polarisation de l'espace autour des noeuds des réseaux de transport est aujourd'hui un fait en milieu urbain. La forme du maillage des réseaux de transport joue un rôle prédominant dans la concentration et la répartition spatiale de l'offre diversifiée.

1.2.2 Prismes espace-temps individuels.

Pour un motif de déplacement, c'est-à-dire une partie du panier d'activités qu'il souhaite réaliser (il peut s'agir d'une unique activité), plusieurs destinations peuvent y satisfaire. Les firmes en concurrence sur la/les activité(s) à réaliser sont localisées en différents lieux, situés dans une ou des zones de la région. Dans le choix de la destination nous devons aussi intégrer les activités précédentes et les activités à venir qui doivent influencer le choix marginal de la destination. L'idée sous-jacente est que le consommateur cherche à concentrer spatialement le calendrier de ses activités afin de profiter au mieux de ses ressources nettes des frais de déplacement, alors augmentées par la réduction de l'espace géographique de leurs réalisations. Le panier d'activité est réalisé par une succession de localisations et déplacements. Il paraît raisonnable de penser que le consommateur gère au mieux ses contraintes espace, temps et budget afin d'organiser le calendrier d'activités lui permettant de se satisfaire au mieux de ses possibilités. Les choix de destination caractérisent l'organisation spatiale du panier d'activités souhaitant et/ou devant être réalisé par l'individu. Les déterminants de ces choix sont différenciés selon les motifs de déplacement. Soulignons que parfois le choix de la destination ne se pose pas, dépendant à la fois du motif du déplacement et de la diversité spatiale des points d'accès aux activités souhaitant être réalisées. Par exemple, la plupart des travailleurs ont, à court terme, leur lieu de travail prédéterminé, résultant de la signature d'un contrat de travail suite à l'expression des caractéristiques de l'offre de travail du consommateur. A supposer que la demande pour une activité (durée, quantités, et horaires de début et fin) est déterminée ex ante dans la programmation spatiale d'un calendrier souhaité par l'individu, il semble crédible que celui-ci ne souhaite pas y associer une allocation budgétaire et temporelle au transport qui, relativement, occupe une place importante dans le coût généralisé total de la réalisation de son activité. Nous soulignons dans ce contexte que la concentration d'activités de différents types complémentaires dans un même zone géographique favorise son attractivité, les consommateurs pouvant alors les associer entre elles sans avoir à subir de contraintes spatio-temporelles supplémentaires significatives. Pouvoir réaliser plusieurs activités à une même localisation permet d'épargner une partie des allocations au transport, et ainsi pouvoir les redistribuer à d'autres motifs plus utiles, voir productifs. Un individu pourra être incité à choisir une destination moins accessible s'il y a complémentarité, variété et différenciation prononcée des biens et services accessibles, c'est-à-dire s'il y a concentration spatiale de pôles d'activités complémentaires en cette destination.

La localisation résidentielle conditionne le choix d'une ou plusieurs destinations. Si celle-ci est excentrée des zones à fortes intensités commerciales, industrielles, et touristiques, nous envisageons trois conséquences possibles sur l'expression de la demande de transport du consommateur : chercher à regrouper ses activités dans le temps et l'espace ; effectuer plusieurs tournées, baisser ses fréquences de déplacements. Bien que la localisation résidentielle apparaisse comme le point géographique central où débute et se termine tous les cycles de déplacements du ménage y résidant, elle ne constitue pas le seul point de référence permettant l'organisation spatiale des activités : l'enchaînement des activités ne se synthétise pas par la réalisation d'une unique tournée de déplacements. Il existe des tournées secondaires, exploitant comme nouveau point de référence l'une des destinations de la tournée principale, à partir duquel elle débute et se termine. Le nombre de tournées, associées au schéma spatial des destinations, caractérise la fréquence des déplacements individuels. Par ces propos, plus le nombre de tournées est important, plus la fréquence de déplacement est élevée. Si tel est le cas au niveau macroéconomique, la conséquence est un étalement des horaires de congestion.

Donnons nous un panier d'activités, dont la programmation horaire est prédéterminée : nous discuterons cette hypothèse restrictive plus avant. Supposons aussi que ce panier doit être réalisé au cours d'une période dont la longueur est donnée. De fait, le consommateur sait qu'il est contraint dans le temps pour effectuer ses souhaits et/ou obligations. Il sait aussi, sauf cas exceptionnel, qu'il va devoir se déplacer dans l'espace pour parvenir à ses fins : le recours à l'activité intermédiaire de transport est nécessaire, mais induit une allocation de budget et temps spécifiques. Toujours pour simplifier, supposons pour le moment qu'il n'y a qu'un mode de transport possible, que son point de départ initial est son domicile, et qu'il choisira toujours le chemin le plus rapide : ici encore, ces hypothèses restrictives sont à relativiser, et seront détaillées plus avant. Considérée comme non utile en soi, il souhaite minimiser cette perte associée à la nécessité de se déplacer. Il souhaite aussi respecter la dynamique calendaire qu'il s'impose dans l'expression de ses demandes d'activités. Supposons celle-ci donnée de façon à disposer d'un ordre hiérarchique sur les activités du panier. Pour certaines, leur programmation horaire constitue à elle seule un déterminant de la demande de transport associée. La résultante de la dynamique calendaire est un ensemble d'intervalles de temps au cours de l'horloge durant lesquels l'individu doit organiser ses déplacements. A partir de son domicile, l'individu doit se déplacer jusqu'à sa première destination pour effectuer la suite de son calendrier d'activités. Soit

il est contraint à se déplacer en un point donné, soit il peut le choisir librement. Dans ce dernier cas, il effectue ce choix en fonction des caractéristiques et prix des offres, en fonction des conditions de transport sur le corridor origine-destination associé, mais aussi en fonction des conséquences sur les choix futurs des destinations libres d'activités restant à réaliser, et sur les points fixes restant dans sa ou ses tournées de déplacement. Le choix de sa destination conditionne ses coûts de transport pour l'organisation spatiale du reste des activités. S'il excentre sa destination, il doit allouer plus de temps et budget au déplacement pour y accéder, mais aussi aux déplacements futurs qui convergent à la fin du cycle à nouveau vers le domicile. De sa première destination libre, devenue sa nouvelle localisation, soit il doit se réorienter vers un point fixe pour la suite de son calendrier, soit il peut à nouveau choisir librement sa destination. Le raisonnement reste le même. De façon récursive, il construit l'enchaînement spatial de ses activités. Le prisme espace-temps est une approche intuitive et réaliste de la représentation de cette planification dans l'espace. Il doit être conçu et interprété comme le milieu idéal, homogène, continu et illimité dans lequel l'individu situe ses perceptions et ses mouvements, c'est-à-dire ses déplacements entre plusieurs points au cours d'un cycle temporel donné. Il existe virtuellement une infinité de prismes pour une population d'individu, peut être même pour chacun d'entre eux. Nous pensons qu'il est possible d'identifier un squelette commun à tous ceux-ci, c'est-à-dire une norme établie par l'individu, laquelle nous permet de pouvoir expliquer comment se constitue la rationalité de l'enchaînement spatial des lieux où la consommation d'activités est satisfaites. Donnons nous pour point d'origine initial le domicile du ménage du consommateur. Pour sa ou ses première(s) activité(s), il peut, s'il est libre de le faire, choisir la destination où elles seraient réalisées. A destination, il satisfait ses demandes en y allouant le budget monétaire nécessaire et le budget temporel souhaité. Il sait, s'il lui reste encore une partie de son panier à réaliser, qu'il doit à nouveau changer de localisation, et ce finalement tant qu'il n'aura pas satisfait à l'ensemble de ses demandes et/ou obligations. Sachant cela, il va rationnellement tenter de circonscrire dans l'espace l'ensemble de sa tournée : il tente d'ajuster au plus bas ses coûts budgétaires, et surtout temporels, relatifs à ses déplacements. Dans ce schéma de raisonnement, la localisation d'une destination dépend de la localisation résidentielle et de celles de toutes les autres destinations à envisager. Cette circonscription spatiale caractérise le prisme espace-temps de l'individu. Une décomposition cohérente de ce prisme individuel peut être conçue par un séquençage de la dynamique des activités à réaliser, en accord avec la démarche

proposée par Bowman(??), Ben-Akiva et Bowman(??). Le consommateur exprime une suite de demandes d'activités dans l'espace et le temps, c'est-à-dire, qu'il souhaite allouer une partie de son temps et de son budget à celles-ci à certains horaires et certains lieux. Le séquençage horaire, que nous supposons pour le moment donné, établit un ordre de réalisation des activités sur l'horloge du temps. Le choix de ce séquençage dépend d'une hiérarchie naturelle s'établissant sur les différents types d'activités. Par exemple, les activités primaires, puis mandataires, puis secondaires et enfin somptuaires. Bhat(??) souligne l'hétérogénéité intrinsèque de cette typologie, et détaille les types d'activités selon qu'elles soit de natures collectives ou non, impliquant l'individu seul ou non et pour cette dernière possibilité s'il s'agit d'autres membres du ménage ou non, et si elles imposent des contraintes de régularité à plus long terme ou non, tout en conservant la nomenclature initiale.

Le choix d'une destination particulière dépend du niveau des prix qu'elles propose pour la réalisation d'une ou plusieurs activités. Une augmentation du niveau des prix d'une destination engendre un double effet de substitution : le premier est de nature spatiale et, à niveaux de demandes d'activités donnés, l'individu est incité à réviser son choix concernant cette destination ; le second effet de substitution porte sur les niveaux de demandes d'activités du consommateur. Si les prix augmentent, la destination étant donnée, l'individu diminue sa demande pour ses activités concernées : il dépense moins pour celles-ci soit en temps, soit en budget, soit les deux, et répartit ce surplus entre le reste de ses activités. Si la destination était initialement prévue pour la réalisation des activités auxquelles il préfère en substituer d'autres suite à l'augmentation des prix, il est incité à réviser le choix de sa destination. Plus fondamentalement, c'est la révision de son panier d'activités qui cause une nouvelle problématique de choix de ses localisations spatiales. Etre incité à réviser une localisation remet en cause toute l'organisation spatiale des activités. Une augmentation du niveau des prix d'une destination engendre aussi un effet revenu négatif, affectant directement le pouvoir d'achat du consommateur sur les activités qu'il souhaite y réaliser, et l'incitant à chercher une autre localisation.

Le choix d'une destination pour une activité dépend des degrés des contraintes horaires et spatiales de toutes les activités présentes dans le panier de consommation. Par degrés de contraintes, nous entendons surtout la possibilité ou non de pouvoir choisir. Les activités primaires telles le travail où l'école, la plupart des activités mandataires aussi, ont très souvent des destinations prédéterminées pour l'organisation spatiale du panier de toutes les activités devant et/ou souhaitant être

réalisées. Le prisme espace-temps de l'individu y est sensible : la circonscription spatiale s'organise autour de ces points fixes. Réciproquement, le choix d'une destination particulière peut causer l'horaire de sa réalisation, donc celle du déplacement associé compte tenu des réseaux de transport accessibles. Si l'individu souhaite se rendre en un point particulier pour y réaliser une ou plusieurs activités, et s'il sait qu'il doit se livrer en premier lieu à d'autres activités, parce qu'il y est contraint ou que celles-ci sont prédominantes, il va choisir un horaire de réalisation lui permettant un enchaînement spatial des localisations en accord avec une demande de transport dont les coûts budgétaires et temporels sont minimaux, mais permettent de satisfaire le besoin de mobilité dans les conditions souhaitées par l'individu, par exemple la sécurité et le confort. Nous discuterons du choix des horaires de déplacement plus avant.

La durée allouée à la réalisation de l'activité affecte le choix de la destination où ce doit être fait. Le consommateur souhaitant restreindre une allocation en temps à une activité pour que d'autres activités puissent en bénéficier, voit le poids du coût de transport en termes budgétaires et temporels augmenter dans le coût total de la réalisation de l'activité à partir du point d'origine. Remarquons qu'un accroissement du poids du coût de transport dans le coût total transite aussi par une dégradation des conditions de transport, en général une saturation de leurs capacités d'absorption. A niveau de demande donné, et dans la mesure où le transport est une activité désutile, il va tenter de choisir une destination plus facilement accessible. Ceci étant, les caractéristiques de l'offre sur cette nouvelle localisation peuvent être différentes : le coût de l'activité et ses caractéristiques n'est pas nécessairement le même. En outre, la modification de la localisation spatiale pour ce motif engendre une révision de l'organisation spatiale de tout le panier d'activités pour celles pouvant l'être.

1.3 Modes de transport.

Le choix d'un mode de transport est un élément clé de la prévision des flux de voyageurs sur les différents types de réseaux de transport coexistant dans un espace géographique donné. L'agrégation des choix individuels de modes de transport détermine les volumes de voyageurs sur chacun des corridors origine-destination envisagés par le planificateur, c'est-à-dire dépendant de la codification géographique de la zone qu'il analyse. Pour des capacités d'absorption données concernant les réseaux routiers et des grilles de fréquences de circulation des modes de transport en commun,

et à supposer que le calendrier horaire et spatial des activités à réaliser est donné pour chaque individu de la population de voyageurs, nous observons une dynamique horaire de la répartition par modes des volumes de voyageurs sur les différents corridors, conditionnant à son tour la dynamique temporelle des durées de parcours sur les différents itinéraires. Plusieurs types de moyens de transport peuvent coexister sur un même corridor origine-destination. Nous distinguons généralement les modes de transport recourant à l'utilisation d'un capital privé de mobilité (automobiles, motos,...) de ceux dont l'utilisation passe par une utilisation temporaire d'un capital de mobilité mis à la disposition d'une population de voyageurs. Ces derniers sont qualifiés de transports en commun, mais cette terminologie recouvre un large spectre de possibilités dès que nous considérons que tout moyen permettant à deux individus au moins n'ayant aucune interrelation sociale de voyager ensemble est un mode de transport en commun. Ils se concurrencent sur différents itinéraires, qui peuvent être les mêmes ou non, permettant au voyageur d'effectuer son déplacement. Chaque mode de transport est caractérisé par un ou plusieurs opérateurs exploitant cette technologie. Nous devons comprendre et examiner les déterminants du choix d'un mode de transport afin de pouvoir évaluer l'efficacité d'une politique économique favorisant, ou défavorisant, son usage : inciter à l'usage des transports en commun afin par exemple de réduire les niveaux de pollution atmosphérique en milieu urbain, introduire de nouveaux types de véhicule motorisés et/ou de nouveaux transports en commun, construire de nouveaux segments routiers, accroître les capacités de certains arcs routiers, modifier les grilles de fréquences des transports en commun,.... Au niveau de l'individu, celui-ci va réagir à toute modification des conditions d'offre : en particulier, il va être sensible aux conditions de circulation et à la durée qu'il met pour se déplacer. Dans le but d'aller toujours plus vite pour compenser la désutilité de son activité de transport, l'individu va arbitrer entre coût du trajet et temps du trajet conditionnellement à un ensemble d'autres facteurs. A son équilibre, si modification de la durée il y a, l'individu sera alors capable d'évaluer la perte de satisfaction qu'elle engendre et ainsi valoriser le prix qu'il est prêt à payer pour éviter cette situation et maintenir le même niveau de bien-être, toutes choses égales par ailleurs. Réciproquement, il est important de pouvoir mesurer le gain de bien-être lié à une amélioration des conditions de déplacement : cela permet alors de mesurer la propension à payer des voyageurs pour obtenir cette situation.

Selon sa localisation résidentielle, les points fixes de son prisme espace-temps, et les destinations qu'il envisage, l'individu a accès à une variété de modes de transport

sur chacun des corridors lui permettant de joindre ces localisations. Le choix d'un mode de transport est un acte naturel pour se déplacer, mais il convient de mieux comprendre le pourquoi d'une telle décision : analyser et anticiper les décisions d'un individu est une démarche utile à la construction d'un plan de déplacement urbain adapté aux besoins et rythmes de vie de la population y résidant. Un fait stylisé est la formation d'une forme de dépendance de l'individu à l'automobile. L'automobile occupe une place centrale dans la réalisation des paniers d'activités des consommateurs. Une externalité négative non négligeable d'un usage intensif de l'automobile en milieu urbain est d'ordre environnemental : quatre-vingt dix neuf pour cent des véhicules routiers fonctionnent aujourd'hui avec des moteurs thermiques. Les progrès importants réalisés depuis les années soixante-dix ne suffisent pas et les efforts de réduction des émissions de polluants restent nécessaires, et s'imposent même par la sévèrisation de certaines normes en milieu urbain. Les conditions et les critères d'une mobilité soutenable doivent être définis. Les marges de manœuvre de l'action publique doivent être établies afin de soutenir un certain nombre de politiques de transport en accord avec l'idée de développement durable. Ceci suppose de pouvoir réunir et confronter les déterminants environnementaux, les conditions et le niveau de financement des infrastructures des réseaux transports, l'évolution des besoins démographiques, notamment résidentiels et industriels, mais aussi tenter de développer un certain nombre de politiques d'incitation à l'usage de véhicule alternatif à l'automobile à moteur à essence. Dans ce domaine, les recherches portent sur la réduction des pertes dans la conversion d'énergie, le traitement des gaz d'échappement et les nuisances liées au bruit. Les directions de recherche pour l'amélioration, l'adaptation et l'accroissement des services de mobilité sont nombreuses : diversification des gammes de véhicules, services pour faciliter l'intermodalité et l'articulation entre les différentes échelles de territoires, l'information aux passagers, la qualité des espaces et services dans les pôles d'échanges de voyageurs, l'amélioration et l'adaptation des systèmes de tarification et de paiement, les politiques de gestion du stationnement, le développement de plans de déplacement d'entreprises, le développement de services adaptés aux personnes à capacité de mobilité physique limitée, etc....

Les caractéristiques technologiques d'un mode de transport conditionnent fortement les durées de parcours qu'il offre sur les différents itinéraires de son réseau. Cette évidence tend à s'effacer avec le temps et la taille de l'agglomération urbaine. L'absorption du progrès technologique dans les pratiques de déplacement n'est pas continue dans le temps et s'effectue par saut. Ses effets modifient à court et moyen

terme la répartition spatiale de flux de voyageurs, à la fois dans leurs volumes et leurs façons de se déplacer. Le gain technologique se traduit par une baisse des temps des trajets incitant les individus à augmenter leurs fréquences de déplacements, et il privilégie le mode de transport générant cette potentielle épargne de temps supplémentaire. Selon le type de réseau, l'amplitude de cet effet technologique est amenuisée par des effets externes négatifs relatifs à la formation d'un phénomène de congestion. Si un moyen de transport devient plus attractif parce qu'il autorise de plus rapides déplacements, la formation d'un niveau de demande important sur certains itinéraires peut générer congestion physique sur ceux-ci. Ce fait est remarquable sur les réseaux routiers et plus difficile à discerner sur les réseaux ferrés. Pour ces derniers, nous pensons particulièrement à l'existence d'hétérogénéité dans les technologies utilisées sur un itinéraire : celles produisant les durées les plus longues vont interférer sur les durées les plus courtes, n'étant pas toujours possible de diversifier les itinéraires de façon à ne pas les mélanger. Par exemple, il est en général difficile de faire dépasser un train par un autre sur les mêmes rails : si celui qui est le plus lent est le premier à partir, il peut jouer le rôle de tampon, c'est-à-dire de borne supérieure pour la vitesse de déplacement du train suivant. Plus les fréquences de passage sont élevées, plus la probabilité de voir émerger cette problématique est grande.

L'incorporation du progrès technologique reste lente et ne peut être réalisée sans un financement adéquat, répercuté dans la tarification des réseaux, et plus généralement dans les coûts de transport d'un individu : plus un moyen de transport propose de se déplacer rapidement, plus il est monétairement coûteux à son utilisation. Les caractéristiques tarifaires des contrats de transport offerts par un mode jouent un rôle évident et prédominant. Le coût de chaque déplacement intervient dans le coût total de la réalisation du panier d'activités envisagé par l'individu. Sous sa contrainte budgétaire, sachant sa demande d'activités, il est contraint budgétairement dans l'organisation de ses voyages. La situation idéalisée est certainement celle où les modes de transport permettent de se déplacer rapidement et à faibles coûts. Dans ce contexte, nous comprenons mieux la très forte dépendance à l'automobile de la mobilité des individus, s'agissant du moyen de transport dont la flexibilité autorise plus facilement des gains de temps et dont les coûts d'utilisation en milieu urbain s'avèrent dans de très nombreux cas plus faibles que n'importe quel autre mode de transport. L'automobile facilite la substitution dans l'espace et le temps des activités, leurs destinations et horaires. Développer à court terme l'attractivité de

modes de transport dont les effets externes sont moins néfastes impose de pratiquer une tarification adaptée, de façon à favoriser l'effet de substitution et l'appuyer par l'effet revenu que pourrait engendrer une baisse de leurs prix d'utilisation. Les faits montrent que la solution ne réside pas dans l'incitation au seul usage des transports en commun. Les politiques favorisant le covoiturage portent des fruits non négligeables lorsque les infrastructures de transport et leur tarification sont adaptée, par l'existence de voies réservées et d'abaissement tarifaires (exemption des péages par exemple). Les politiques d'incitation à l'usage de véhicules à énergies alternatives doivent être considérées, et sont en accord avec la notion de développement durable en milieu urbain. Les politiques dites de "park&ride" ont aussi leur intérêt : elles considèrent le développement de plate-forme intermodale favorisant les transports en commun à l'entrée de zone fortement urbanisées. Remarquons aussi les politiques de tarification de la congestion, consistant à installer des barrières de péages à l'entrée de zones dont les réseaux routiers sont fortement congestionnés relativement aux réseaux de transports en commun. Les marges de manoeuvres sont larges dans la définition de politiques permettant de favoriser un certain type d'usage collectif des réseaux de transport.

Les travaux récents suggère la persistance de caractéristiques qualitatives dans l'appréciation de l'offre de transport, telles la sécurité associée au déplacement ou encore le niveau de confort dans sa réalisation. Difficilement mesurables, ces facteurs constituent une incitation ou non à l'usage d'un mode de transport. Par exemple, nous comprenons aisément le désagrément causé par une surcharge de passagers dans un wagon lors des heures de pointe : le manque d'espace vital et la quasi-certitude de rester debout sont une incitation à changer de façon de voyager, éventuellement changer de mode de transport. Plus généralement, les caractéristiques socio-économiques et démographiques de l'individu jouent un rôle causal certain dans le choix d'un mode de transport. Ces effets qualitatifs sont à relativiser par exemple selon l'âge, le sexe, la catégorie socioprofessionnelle. Les préférences du consommateur étant conditionnées par ses propres caractéristiques, les mécanismes d'incitation sont fortement différenciés, les attentes de chacun en termes d'attributs de transport étant différentes.

Lorsque dans un ménage le nombre de véhicules par travailleur est un strictement inférieur à 1, il subit une contrainte de capacité. Deux possibilités sont envisageables : soit il n'y a aucun véhicule à partager entre les membres et dans ce cas ils sont tous les deux contraints dans leur mobilité, soit il n'y a qu'un véhicule pour

deux travailleurs et dans ce cas chacun doit pouvoir légitimer son désir de l'utiliser. Nous ne modélisons pas ici le processus de négociation entre les membres mais nous considérons qu'il peut causer le résultat observable de contrainte de mobilité pour un travailleur. Si à court terme les capacités automobiles du ménage et les conséquences au niveau de chaque travailleur sont fixés, il nous néanmoms considérer avec réalisme les effets induits par les situations de choix du mode transport auxquelles ils font face : acquisition de nouveaux véhicules (au moins un) ; renégociation du partage de l'utilisation du capital automobile avec les autres membres du ménage ; amélioration des conditions de trajet par d'autres modes de transport pour le travailleur du ménage utilisant l'automobile en cas de contraintes de capacité, incitant à la renégociation.... Une mauvaise allocation du capital au niveau individuel peut engendrer un coût supplémentaire au niveau du ménage : précisément, en cas de contrainte, l'allocation du véhicule sans jeu coopératif peut conduire à une diminution du bien-être de tout le ménage.

La possession et l'utilisation d'un capital privé de mobilité est influencée par le cycle de vie du consommateur. La structure du ménage auquel appartient le voyageur, ses choix de long terme influence le nombre de véhicules motorisés qu'il serait souhaitable de posséder et utiliser pour qu'au niveau du ménage le bien-être soit maximal. L'acquisition d'un véhicule peut passer soit par l'achat (acquisition du titre de propriété du véhicule) soit par la location. Le fait de pouvoir disposer ou non d'un véhicule en tant que conducteur pour effectuer une partie de ses déplacements conditionne, outre l'ensemble des modes de transports accessibles, les préférences du voyageur en termes de modes de transport. Nous soulignons plusieurs résultats : le degré de substituabilité entre modes de transport disponibles sur un corridor origine-destination augmente lorsqu'il n'est pas possible d'utiliser un véhicule motorisé en tant que conducteur. Le consommateur est relativement plus incité à participer à une politique de covoiturage lorsqu'il dispose d'un véhicule motorisé en tant que conducteur. Il souhaite pouvoir bénéficier des économies budgétaires qu'elle engendre sans avoir à relâcher la flexibilité de l'organisation de ses déplacements. Lorsque l'individu ne peut être le conducteur d'un véhicule motorisé, il accorde relativement plus d'importance à son temps de parcours et relativement moins d'importance à son coût monétaire que lorsqu'il peut disposer personnellement du véhicule. L'ensemble des choix possibles est conditionné par la présence ou non d'une contrainte de capacité au niveau du travailleur. Outre des ensembles de choix différents selon la présence ou non de contraintes de capacité et/ou d'utilisation, nous pensons que les goûts des

voyageurs ne sont pas les mêmes selon la situation de choix à laquelle ils font face. Leurs perceptions des attributs de marché, ainsi que l'importance qu'ils accordent à leurs propres caractéristiques dans le processus décisionnel ne sont plus les mêmes. Cette idée est en accord avec l'intuition selon laquelle l'absence à court terme du mode de transport offrant le plus de flexibilité et d'autonomie dans l'organisation du déplacement engendre un choc sur les goûts et perceptions du consommateur en termes de modes de transport. Le choix reste cependant conçu comme un arbitrage personnel entre les performances des réseaux en concurrence sur le trajet à effectuer.

L'analyse de ce seul choix semble être insuffisante pour décrire totalement la demande individuelle de transport. En milieu urbain, il n'existe pas, ou trop rarement pour être considéré, de réseau où pour chaque paire origine-destination un unique itinéraire existe : plusieurs possibilités de déplacements dans l'espace entre une origine et une destination sont à envisager. De même, les individus d'une région ne se déplacent pas tous au même moment, car ils n'ont pas le même cycle et rythme de vie : leurs demandes d'activités ne sont pas identiques pour tous, les contraintes organisationnelles et budgétaires sont différenciées. Ainsi, pour un mode de transport donné il reste encore à comprendre l'organisation spatiale et temporelle de son utilisation : les déterminants de l'attractivité d'un mode de transport sont conditionnés par celle-ci. Ainsi, pour une paire origine-destination donnée, la durée d'un trajet n'est pas la même selon l'heure à laquelle il est effectué et selon l'itinéraire exact utilisé pour effectuer le voyage. Nous remarquons de même que pour les modes ne relevant pas du transport urbain², le coût du voyage (essence et hors essence) est aussi variable, fonction des choix de l'horaire et du chemin.

1.4 Itinéraires et horaires.

Si chaque individu a son propre cycle de vie et rythme de vie, sa vie en agglomération urbaine lui impose le respect de certaines normes sociales et contraintes organisationnelles partagées par l'ensemble de la population. Nous observons certaines similarités dans les calendriers de leurs déplacements, notamment au niveau

²Pour ceux-ci, les mécanismes de tarification peuvent ne pas dépendre de l'horaire et itinéraire associé. Il s'agit par exemple du cas du Syndicat de Transports d'Ile-de-France (S.T.I.F.), pratiquant une tarification par zones géographique. Il faut aussi remarquer que d'autres opérateurs de transports en commun pratiquent une tarification à la durée d'utilisation du ticket de voyage, comme par exemple dans la région de la baie de San Francisco. La dépendance des conditions tarifaire à l'horaire et l'itinéraire du voyage n'apparaît pas comme une généralité.

horaire, indépendamment de leurs caractéristiques socio-économiques et démographiques. L'usage des réseaux de transport étant collectif, ces similarités engendrent au niveau agrégé certains moments de la journée où ils ne pourront absorber des flux entrants trop importants s'ils ne sont pas adaptés à la répartition spatiale démographique de la population et de leurs calendriers spatiaux et temporels d'activités. Supposons que le panier d'activités de l'individu soit programmé dans le temps et l'espace. Pour la demande de transport associée, supposons que l'ensemble des modes de transport permettant de transiter entre les différentes zones au cours des différentes tournées soit aussi prédéterminé. Il reste dans ce cas à savoir à quelle heure programmer ses déplacements dans les fenêtres lui restant sur l'horloge du temps afin de joindre ses différentes destinations. Le choix d'un horaire, auquel partir d'un point d'origine pour se rendre à une destination donnée par un mode donné et un itinéraire prédéterminé, s'impose lorsque le consommateur est contraint, ou se contraint, à devoir respecter un horaire auquel débiter ses activités prévues à cette destination. La planification horaire est un élément devenu aujourd'hui central dans la compréhension du comportement de voyageur urbain d'un individu. A capacités d'offres données à court terme, il existe certains moments dans le cycle de l'horloge du temps où il y a saturation physique des réseaux de transport. La demande est contrainte par l'offre et dégrade d'elle-même les conditions de ses déplacements. Il faut aussi savoir par quel chemin, ou itinéraire, transiter. Cette dernière considération émerge dès que nous considérons de façon réaliste que les réseaux de transport en milieu urbain sont fortement maillés : le nombre de noeuds liant les différents arcs est important.

Comprendre la dynamique horaire des déplacements des individus est un enjeu majeur pour les politiques de gestion de la congestion routière, pour les politiques d'incitation à l'utilisation des transports en commun, et de façon plus générale pour une adaptation rapide de l'offre à court terme en fonction des besoins en déplacements d'une population.

Les contraintes horaires sont de nature double : elles peuvent être exogène à la planification des activités, auquel cas l'individu ne peut y faire défaut. Il s'agit de contraintes de planification qui résultent de décisions prises à long terme. Elles peuvent être endogènes au mécanisme de sélection et organisation du panier d'activités à réaliser au cours de la journée, auquel cas comment déterminer l'importance de ces contraintes calendaires innées ? Les travaux de Bowman et Ben-Akiva(1997), Bowman(??), Ben-Akiva et al.(1998), Ben-Akiva et Bowman(1998) exploitent une

hiérarchisation des activités par degrés d'importance, ces derniers étant définis par la nature primaire, mandataire, secondaire ou somptuaire de chaque activité. Ben-Akiva, Bowman et Gopinath(1996), Ben-Akiva et dePalma(1996) analysent la problématique de la génération de paniers d'activités par une typologie plus détaillée.

Le choix d'un itinéraire est un aspect de la demande de transport dont l'analyse est complexe. Le choix d'un ensemble d'itinéraires est la résultante d'une localisation résidentielle à partir de laquelle s'organise dans le temps et l'espace les demandes d'activités émises par le consommateur. Pour une suite de destinations données et un ensemble de différents modes de transport, il organise ses déplacements dans l'espace : il doit choisir par où circuler pour joindre les différentes localisations d'intérêt. Il est difficile de décrire de façon exhaustive la famille des règles de décisions conduisant au choix d'un chemin particulier. Nous en présentons ici quelques unes qui ont retenu l'attention des théoriciens et praticiens depuis de nombreuses années. Deux règles heuristiques élémentaires sont discutées, puis le principe de Wardrop(1952) est présenté. Ce dernier est aujourd'hui devenu la référence des algorithmes d'allocation des flux sur un réseau : de nombreux systèmes exploitent cette méthodologie dans le calcul de la prévision de la répartition sur les itinéraires des volumes de voyageurs.

Le choix du chemin le plus court est la règle de décision la plus élémentaire dans la construction d'un mécanisme heuristique de sélection d'un itinéraire. Elle impose que l'individu ne détermine le choix de ses itinéraires que sur un simple arbitrage de mesures de distances entre différents points. Il ne prend pas en compte l'aspect collectif de l'usage des réseaux de transports : quel que soit le niveau de congestion sur les itinéraires envisagés sur les différents réseaux accessibles entre le point origine et le point destination, il circulera par les arcs des réseaux lui assurant la distance minimale à parcourir. Ce type de comportement d'utilisateur reste adapté à la représentation d'un comportement de choix d'itinéraires par de nouveaux résidents dans la région géographique, mais avec l'accumulation d'expérience par le voyageur à moyen et long terme, son apprentissage de la dynamique de la congestion, choisir le chemin le plus court ne permet pas de caractériser un comportement rationnel suggérant que l'individu cherche en partie à minimiser l'allocation de ressources en temps à l'activité désutile de transport. Le choix du chemin le plus court autorise l'individu à choisir un itinéraire forçant l'allocation d'une ressource en temps strictement supérieure au minimum nécessaire. En présence de congestion c'est une règle difficilement acceptable dans la mesure où le temps et la distance ne sont plus deux

mesures strictement proportionnelles. L'omission de la contrainte d'offre de capacité conduit à des résultats contre intuitifs, le voyageur pouvant choisir un itinéraire congestionné.

Les enjeux liés à la gestion de la congestion sur les réseaux de transport impose le développement d'autres règles heuristiques. Choisir le chemin le plus rapide considère pour seul critère de sélection de l'itinéraire le temps de parcours. Il est important de souligner une différence importante avec la règle de décision fondée sur le choix du chemin le plus court. Si cette dernière impose l'invariance de l'itinéraire choisi avec l'horaire du déplacement, choisir le chemin le plus rapide peut conduire à des décisions effectives différentes selon les horaires auxquels l'individu doit se déplacer. Selon l'agrégation des programmations horaires individuelles, la dynamique des flux de voyageurs n'est pas la même, mais en toutes circonstances les volume circulant sur les réseaux de transport varient au cours de la journée. Selon les capacités d'absorption des arcs des réseaux s'établit une dynamique du niveau de la congestion, externalité négative engendrant une augmentation des temps de parcours pendant la période où elle a lieu. Le choix de l'itinéraire le plus rapide est dépendant du degré d'uniformité des calendriers des individus de la population, causant la dynamique horaire de la congestion. Selon l'horaire de déplacement d'un individu, un même itinéraire peut ne plus être le chemin le plus rapide parmi l'ensemble des itinéraires possibles sur le corridor origine-destination.

Dans la pratique, le choix d'itinéraires est résolu en ayant recours à des règles heuristiques d'allocation des flux sur les réseaux de transport fondées sur une combinaison de critères de sélection. La règle d'allocation dominante est connue sous la dénomination de principe de Wardrop(1952) : chaque voyageur cherche l'itinéraire qui lui permet de minimiser une fonction de coût généralisé de transport. Cette dernière combine un ensemble de critères d'intérêt pour l'individu, tels le coût et la durée du trajet. Cette durée sur l'itinéraire dépend elle-même du volume total de voyageurs y circulant au moment où l'individu doit se déplacer. L'individu rationnel choisit l'itinéraire permettant de minimiser ce coût généralisé. A partir du moment où il y a congestion sur les itinéraires du corridor origine-destination, ce dernier dépend des choix des autres voyageurs circulant au même moment. L'équilibre offre-demande de capacités s'obtient par tâtonnements jusqu'à ce qu'il n'y ait plus de voyageurs pouvant profiter d'une meilleure alternative, c'est-à-dire pouvant dévier unilatéralement dès qu'il peut profiter d'un itinéraire lui permettant de supporter un coût généralisé plus faible. Au point d'équilibre, il n'existe plus de voyageurs

pouvant choisir un itinéraire lui assurant un coût généralisé plus faible. Le trafic se répartit de façon à ce que le coût généralisé subi par chaque voyageur sur le corridor origine-destination soit le même pour tous quel que soit l'itinéraire utilisé. Ce résultat est optimal du point de vue du voyageur : s'il dévie à court terme de son chemin, il subit nécessairement un coût généralisé plus élevé. A long terme, la convergence vers l'équilibre est assurée par une réponse symétrique du reste des voyageurs dès que l'un d'entre eux choisit de dévier de son itinéraire actuel. Une question se pose concernant la dynamique de l'ajustement entre l'offre et la demande : quelle est la période d'apprentissage ? Quelle est la durée du désajustement entre offre et demande ? Dans le cas d'une modification des infrastructures des réseaux de transport, quel est la durée d'adaptation de la demande à la nouvelle offre en termes d'itinéraires ? Soulignons qu'une telle modification induit à son tour différents effets sur la demande d'activités, son organisation spatiale et temporelle, et la demande de modes de transport, la fréquence, les itinéraires et les horaires des déplacements. Plus fondamentalement, peut on s'assurer de l'unicité de cet équilibre ? Les développements récents suggèrent l'existence d'une cohabitation de différents régimes de distribution des flux de voyageurs sur les itinéraires. L'existence d'une hétérogénéité au sein de la population des règles de décision associées au choix d'un itinéraire cause l'existence d'équilibres multiples pour l'allocation de la demande sur les réseaux.

Conclusion : quelles interactions ?

De nombreuses interactions entre les différents déterminants de court terme et long terme de la demande de transport sont à souligner. Il convient de comprendre quels sont les liens de causes à effets entre les différents éléments de la demande de transport, c'est-à-dire quels sont les liens pouvant exister entre les différents choix de localisation résidentielle, de capitalisation en véhicule motorisé, de fréquences de déplacement, de destinations, de modes de transport, d'horaires et itinéraires. D'après nos propos précédents, ils sont contingentés par un ensemble de facteurs relatifs à la génération et l'organisation calendaire et spatial d'un panier d'activités. La mobilité quotidienne est le résultat de la définition dans l'espace et dans le temps d'un programme d'activités par le consommateur. A titre d'illustration, nous proposons le schéma ci-après pour expliciter plus clairement les différentes interactions que nous pouvons considérer. Il doit être interprété comme un cadre général, à partir duquel de nombreuses approches pour la demande individuelle de transport peuvent être

définies. Selon le degré d'endogénéisation de chacun des blocs, la description de la formation de la demande de transport sera plus ou moins complète. Peut-être plus intéressant, la possibilité de hiérarchiser de façon plus explicite les causes et effets entre les différents déterminants. Considérer la problématique de demande de transport dans toute sa généralité conduit à définir un ensemble des possibles considérable pour le voyageur. Sa très grande dimension rend très peu pratique voire irréalisable toute application directe de ce cadre. Sa restriction partielle ne signifie pas nécessairement l'abandon de tous les résultats fondamentaux associés à partir du moment où la définition d'une stratification des différentes décisions de transport peut être effectuée afin d'isoler certains effets de premier plan. Nous en discutons en détail dans le prochain chapitre, cette problématique méritant plus ample développement compte tenu de sa place centrale dans la définition de systèmes de prévision des flux de voyageurs sur les réseaux de transport de la région considérée.

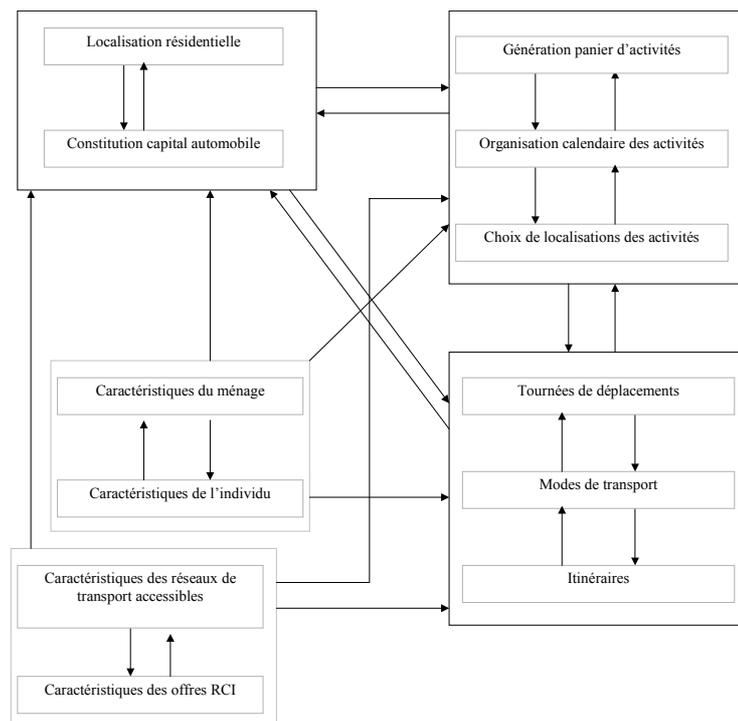


FIG. 1-2 – La formation de la demande individuelle de transport

Dans notre approche d'équilibre partiel concernant la demande de transport, nous supposons l'offre et ses caractéristiques fixées pour les marchés locaux du travail, des biens et services, et des transports. En particulier, les offres résidentielles,

commerciales, et industrielles sont données. Leurs influences respectives, caractérisées par les liens organisant et unissant les différents blocs du graphique ci-dessus ont été discutées au cours des parties précédentes. Pour mieux comprendre ce qui est causé par la demande d'activités à court terme et ce que cause le marché des transports sur sa réalisation, nous procédons logiquement et nous intéressons dans un premier temps au bloc décisionnel de long terme déterminant la localisation et type résidentiel du ménage, donc l'individu, et le niveau du capital automobile. Ses influences sur les décisions de court terme concerne directement l'organisation spatiale et temporelle de la demande d'activités et la demande de transport associées. Les effets que causent en retour les demandes d'activités et transport portent à court terme essentiellement sur le niveau de capital automobile. Les demandes d'activités dépendent étroitement de la localisation résidentielle de l'individu et de ses facilités de déplacement. Elles dépendent aussi directement des caractéristiques de l'individu et de son ménage, ainsi que des caractéristiques des offres d'activités et transport. Nous distinguons dans la formation de la demande d'activité la génération du panier d'activité, c'est-à-dire le choix des activités à réaliser, son organisation calendaire et spatiale, chacun de ces éléments agissant les uns avec les autres. C'est autour de ce calendrier spatial et horaire du panier d'activités qu'il organise sa demande de transport, la façon dont il souhaite se déplacer, caractérisée par le choix de tournées de déplacement, c'est-à dire d'un mode de transport, un horaire et un itinéraire de déplacement. Lorsqu'il n'est pas possible de la satisfaire, l'individu est contraint à réviser ses désirs et souhaits, et réorganiser son panier d'activités, voire le refondre. Le décalage entre réalisme et souhaits de l'individu peut aussi forcer à long terme à se relocaliser et/ou acquérir de nouveaux véhicules automobile si la contrainte de transport porte sur cette problématique. Les questions de la rationalité et de la cohérence du consommateur dans ses choix et l'allocation de ses ressources sont ouvertes. Compte tenu de la dimension de l'ensemble des possibles, structurer et hiérarchiser les éléments constituant les blocs de demande peut nous permettre de définir plus simplement sans grande perte de généralité un cadre d'analyse rigoureux du comportement de choix de l'individu.

Chapitre 2

L'analyse microéconomique de la demande de transport : le rôle central de la valeur du temps.

Introduction.

La modélisation désagrégée de la demande de transport repose sur les limites de l'approche macroéconomique en quatre étapes, souvent appelée approche universelle de la demande de transport, présentée dans McFadden (1975). Elle constitue encore aujourd'hui l'approche la plus communément adoptée, même s'il lui est reproché de reposer sur des fondements trop mécaniques ne capturant pas les comportements et rythmes de vie des voyageurs. Gaudry (1978), McFadden (1975), Koppelman (1975), Koppelman et Ben-Akiva (1977), Ben-Akiva et Lerman (1985), Small (1992) discutent des fondements microéconomiques de la formation des volumes de voyageurs et leur répartition spatiale. Ils reprennent initialement la structure du modèle agrégé et montrent comment elle peut être déduite de comportements rationnels individuels. Ben-Akiva et Bowman (1998,1999), Axhausen (2000) propose une synthèse des développements récents des modèles de transports fondés sur l'analyse des calendriers d'activités. Nous nous plaçons dans un cadre de séparation des préférences par motif d'activité, autorisant l'analyse des déplacements liés à l'activité travail indépendamment des autres activités du calendrier de l'individu au

cours d'une période de longueur donnée. Les conditions précises sont présentées et les limites qu'elles imposent sont discutées.

La tendance naturelle concernant les déplacements des individus porte le nom de loi de Zahavi (voir par exemple Joly, Crozet et al. (2002)) et résulte de l'observation. Ce fait stylisé énonce que les individus se déplacent plus vite, plus loin et plus souvent. Sous-jacent à cette idée, le progrès technologique engendrant l'accroissement des vitesses de déplacement et permettant pour une même ressource naturelle en temps de pouvoir se déplacer plus aisément dans l'espace. Valoriser le temps de transport est nécessaire dès que nous souhaitons nous intéresser à l'entretien de l'efficacité des réseaux de transport et leur influence sur les niveaux de bien-être des consommateurs. Mesurer le consentement à payer d'un individu pour économiser du temps de transport à niveau de bien-être constant définit un mécanisme de tarification sur le marché des transport en fonction de la modification de sa technologie qui soit neutre sur le niveau de satisfaction de l'individu. Nous soulignons qu'une modification de l'offre de transport neutre sur l'utilité du consommateur modifie les valeurs d'équilibre de sa consommation, ses loisirs et sa mobilité.

Nous rappelons dans un premier temps le cadre théorique dans lequel l'analyse est faite. La structure des préférences de l'individu consommateur et celle de l'environnement de choix sont présentées. Nous présentons un cadre d'arbitrage entre consommation, loisirs et mobilité, en présence de contraintes budgétaires, temporelles, et technologiques. La mobilité spatiale est une nécessité pour le consommateur, dans le but de produire des ressources budgétaires par le travail, et dans le but de consommer différents biens loisirs permettant de satisfaire ses besoins élémentaires. Le recours aux réseaux de transport passe par l'organisation de déplacements et tournées, et impose à l'individu d'y allouer une partie de ses ressources. Coûteuse en soi, l'activité de transport constitue un poste de dépenses que l'individu s'efforce de gérer au mieux : rentabilité et efficacité font partie de ses objectifs dans l'organisation de ses déplacements dans l'espace et le temps pour assurer une demande de mobilité souhaitée. Les conditions d'équilibre du modèle sont présentées et discutées. Les interactions entre marché des transport, marché des biens et services et marché des loisirs sont étudiées. Les effets d'une modification de l'offre tarifaire ou technologique sur le marché des transports sont détaillés. Nous précisons ensuite le cadre d'analyse des choix de transport par motif de déplacement. Les restrictions et leurs limites sont discutées. Nos résultats conduisent finalement à définir et discuter du concept de valeur du temps, consentement de l'individu à payer la rapidité

de ses déplacements à niveau de bien-être constant. De nombreuses études ont été faites sur la valeur du temps de transport par exemple Wardman et Mackie(1997) pour la Grande-Bretagne, le rapport TRACE(1997), Piron(1996), O’Dea(1994), McFadden(1998), Lee et Dalvi(1969), Jennings et Sharp(1976), Jara-Diaz(1990), Hensher(1977,1989,2001), Gunn, Chen, et Van de Vyvere(1996), Quarmby(1967), McFadden et Train(1978), de Palma et Fontan(2001), Abraham et Blanchet(1973), Arduin, Ni et Pick(1994). Nous présentons ses propriétés les plus remarquables.

2.1 Le modèle.

2.1.1 L’espace des paniers consommables.

Nous considérons un cadre statique. Pour une période de longueur T , nous modélisons le comportement d’arbitrage de l’individu entre différents biens primaires. L’espace des paniers consommables, noté \mathcal{C} , sera supposé être un sous espace compact de l’orthant non négatif d’un espace euclidien de dimension K . Nous considérons que l’ensemble des paniers consommables résulte du croisement de trois types de biens primaires : consommation, loisir, et mobilité.

La demande sur le marché des biens et service est représentée par une quantité C d’un bien composite s’échangeant à un prix p donné. Le niveau de consommation de l’individu dépend de ses ressources budgétaires et la dépense associée au transport pour satisfaire la demande de mobilité. Il dispose initialement d’une rente exogène R et fait appel au marché du travail pour s’assurer d’autres ressources monétaires.

Le marché du travail permet au consommateur d’accroître ses ressources budgétaires nécessaires à sa consommation et son transport. En choisissant une durée de travail adéquate t_w , rémunérée à un taux unitaire w donné, il ajoute à sa rente exogène R un montant budgétaire wt_w . En contrepartie, compte tenu de cette offre de travail, mais aussi des caractéristiques de l’offre de transport, notamment en terme de temps, le montant de loisir l consommé est déterminé. Pour des conditions d’offre données sur le marché des transports, une augmentation de l’offre de travail engendre un accroissement du budget de l’individu disponible pour sa consommation et sa mobilité, mais diminue sa consommation de loisir.

Le marché des transports permet de répondre à la demande de mobilité, qui se caractérise par des quantités de distance et de fréquences. Ce marché offre des modes et réseaux de transport sur lesquels les individus doivent organiser dans l’espace et

le temps leurs déplacements. Nous le caractérisons par une fonction de tarification de la quantité de mobilité x , notée $c_T(x)$, et par une fonction d'offre de temps de trajet dépendante de la quantité de mobilité, notée $t_T(x)$. Posons $c'_{T,x}(x) \equiv \frac{\partial c_T(x)}{\partial x}$ et $t'_{T,x}(x) \equiv \frac{\partial t_T(x)}{\partial x}$. Pour simplifier la présentation des résultats. Pour simplifier la présentation, nous supposons pour le moment qu'il n'y a qu'une fonction de coût et une fonction de temps sur le marché des transports. Nous reviendrons sur ce problème lors de la discussion sur les choix de transport. Nous supposons que le coût total de transport et le temps total de transport sont des fonctions croissantes de la quantité de mobilité :

$$c'_{T,x}(x) > .0, t'_{T,x}(x) > 0. \quad (2.1)$$

Le marché des transports intervient au travers des contraintes emplois-ressources budgétaires et temporelles du consommateur. Celles-ci prennent la forme suivante :

$$pC + c_T(x) = R + wt_w, \quad (2.2)$$

pour la contrainte budgétaire, et

$$t_w + t_T(x) + l = T. \quad (2.3)$$

Le consommateur dépense son revenu total, somme d'une rente et d'un salaire lié à une durée de travail, à sa consommation et sa mobilité. Il dépense tout son temps à sa consommation, son loisir et sa mobilité.

2.1.2 Préférences et choix rationnel.

Dans le cadre classique de la modélisation du comportement du consommateur, l'environnement dans lequel l'individu effectue ses choix est certain. Nous reviendrons sur cette hypothèse dans un chapitre ultérieur. L'individu a des préférences, notées \succsim , sur l'ensemble \mathcal{C} des paniers consommation-loisir-mobilité.

Nous rappelons ici à titre indicatif les axiomes permettant de représenter \succsim par une fonction d'utilité. La démonstration du théorème de représentation des préférences est due à Debreu(1954). Partons de la situation où deux possibilités a, b de l'ensemble \mathcal{C} de tous les paniers sont proposées au consommateur. Au sens de la

logique booléenne, quatre situations possibles dans la comparaison de celles-ci sont possibles.

Axiom 1 *Complétude et réflexivité.* $\forall a, b \in \mathcal{C}$, soit $a \succcurlyeq b$, soit $b \succcurlyeq a$, soit les deux

L'individu est capable de comparer deux à deux toutes les possibilités et déterminer pour chacune de ces paires le panier au moins préféré à l'autre. Pour que l'individu puisse construire un préordre total sur \mathcal{C} , l'axiome suivant est nécessaire.

Axiom 2 *Transitivité.* $\forall a, b, c \in \mathcal{C}$, si $a \succcurlyeq b$ et $b \succcurlyeq c$, alors $a \succcurlyeq c$.

Nous souhaitons aussi qu'il n'y ait pas de saut dans ses préférences. L'axiome de continuité suivant l'établit.

Axiom 3 *Continuité.* $\forall a \in \mathcal{C}$, les ensembles $\{a \succcurlyeq b, \forall b \in \mathcal{C}\}$ et $\{a \preccurlyeq b, \forall b \in \mathcal{C}\}$ sont fermés et non vides.

Dans un cadre où le bien-être du consommateur croît avec les quantités d'activités et biens et/ou services consommés, nous pouvons attendre de sa part, toutes choses égales par ailleurs, une tendance naturelle à préférer les paniers dont le contenu propose plus de quantités consommables. L'axiome suivant formalise cette intuition.

Axiom 4 *Monotonie.*

Theorem 1 *Représentation des préférences par une fonction d'utilité.* Soit \mathcal{C} un ensemble de possibilités de choix mutuellement exclusives. \succcurlyeq est représentée par une fonction $\mathcal{W} : \mathcal{C} \rightarrow \mathbb{R}$ continue croissante définie à une transformation monotone croissante près si et seulement si \succcurlyeq vérifie les axiome de complétude, réflexivité, transitivité, continuité et monotonie :

$$\forall a, b \in \mathcal{C}, \mathcal{W}(a) \geq \mathcal{W}(b) \Leftrightarrow a \succcurlyeq b. \quad (2.4)$$

Proof. Debreu(1954) ■

Nous supposons pour le reste de l'exposé que les préférences de l'individu sur les paniers consommation-loisir-mobilité peuvent être représentée par une fonction d'utilité. Nous supposons que le consommateur est rationnel s'il cherche à maximiser son niveau d'utilité, c'est-à-dire s'il consomme le panier préféré à tous les autres.

2.1.3 L'équilibre du consommateur.

Au cours de la période de longueur T , le consommateur dépense l'ensemble de ses ressources budgétaires et temporelles. Il doit arbitrer entre la durée de loisirs l , le montant de consommation C , et la quantité de mobilité x en tenant compte des contraintes budgétaires et temporelles auxquelles il doit faire face, dans lesquelles interviennent les caractéristiques tarifaires c_T et technologiques t_T du marché des transports. Il existe une fonction d'utilité \tilde{U}_S représentant les préférences en (C, l, x) d'un individu de caractéristiques S . Il cherche à maximiser son niveau d'utilité $\tilde{U}_S(C, l, x)$. L'équilibre que nous explicitons est partiel : dans notre cadre, l'individu est preneur de prix et technologies sur les marchés de la consommation, du travail et du transport.

La demande de mobilité résulte des demandes de consommation et de loisir de l'individu, mais celles-ci dépendent des conditions tarifaires et technologiques du marché du transport pour une demande de mobilité donnée.

Condition 2 *Les préférences de mobilité du consommateur sont séparables de ses préférences de consommation et loisir.*

La fonction d'utilité de l'individu est séparable en deux fonctions, une étant associée à la consommation et le loisir, l'autre à la mobilité :

$$\tilde{U}_S(C, l, x) = U_S(C, l) + W_S(x)$$

Les demandes de consommation et loisir sont établies conditionnellement à un niveau de mobilité donné. Les niveaux optimaux dépendent, au travers des contraintes budgétaires et temporelles, des caractéristiques de l'offre du marché des transports avec laquelle l'individu doit composer pour maximiser l'utilité associée à sa demande de mobilité. L'individu ajuste dans un second temps sa demande de mobilité ce qui induit un changement des niveaux de consommation et loisir. Son choix optimal de mobilité induit les niveaux des demandes optimales de biens et loisirs.

Nous procédons en deux étapes : le consommateur raisonne pour une demande de mobilité x donnée et détermine ses fonctions de demandes optimales de loisir et consommation, pour des conditions tarifaires et technologiques du marché du transport données. Il détermine dans un second temps sa quantité optimale de transport et rajuste ses niveaux de consommation et loisir. Pour x donnée, le programme de

maximisation de l'utilité $U_S(C, l, x_T)$ du consommateur s'écrit en C, l :

$$\left\{ \begin{array}{l} \max_{C, l} U_S(C, l) + W_S(x) \\ pC + c_T(x) = R + wt_w \\ t_w + t_T(x) + l = T \end{array} \right. \quad (2.5)$$

Les conditions d'équilibre sont classiques. Le taux marginal de substitution loisir-consommation est égal au salaire réel. En posant $U'_{Sl}(C, l) \equiv \frac{\partial U_S(C, l)}{\partial l}$, $U'_{SC}(C, l) \equiv \frac{\partial U_S(C, l)}{\partial C}$:

$$\frac{U'_{Sl}(C, l)}{U'_{SC}(C, l)} = \frac{w}{p} \quad (2.6)$$

Les fonctions de demandes optimales du consommateur sont obtenues en utilisant la condition de l'équation (2.6) et en combinant les deux contraintes du programme définies dans l'équation (2.5). La combinaison des deux contraintes définit une contrainte budget-temps dans le plan consommation-loisir :

$$pC + wl = R - c_T(x) + w(T - t_T(x)). \quad (2.7)$$

Nous notons les demandes optimales conditionnelles à une offre tarifaire et technologique de transport pour un niveau de mobilité x donné :

$$\begin{aligned} C^* &= C^*(R - c_T(x), T - t_T(x), w, p, x_T, S), \\ l^* &= l^*(R - c_T(x), T - t_T(x), w, p, x_T, S). \end{aligned} \quad (2.8)$$

Elle dépendent des prix w et p , et pour une demande de mobilité x donnée, des ressources temporelles nettes des allocations au marché des transports, $T - t_T(x)$, et du revenu exogène grevé de la dépense totale en transport, $R - c_T(x)$. Les effets du marché des transports sur l'équilibre (C^*, l^*) du consommateur sont à préciser. Pour une quantité de mobilité x donnée, toute choses égales par ailleurs, une augmentation du temps total de transport diminue le niveau d'utilité du consommateur. Le graphique ci-dessous précise les différents effets.

Supposons que le temps de transport augmente : la fonction d'offre technologique passe de $t_{T,1}$ à $t_{T,2}$. L'augmentation du temps de transport engendre une diminu-

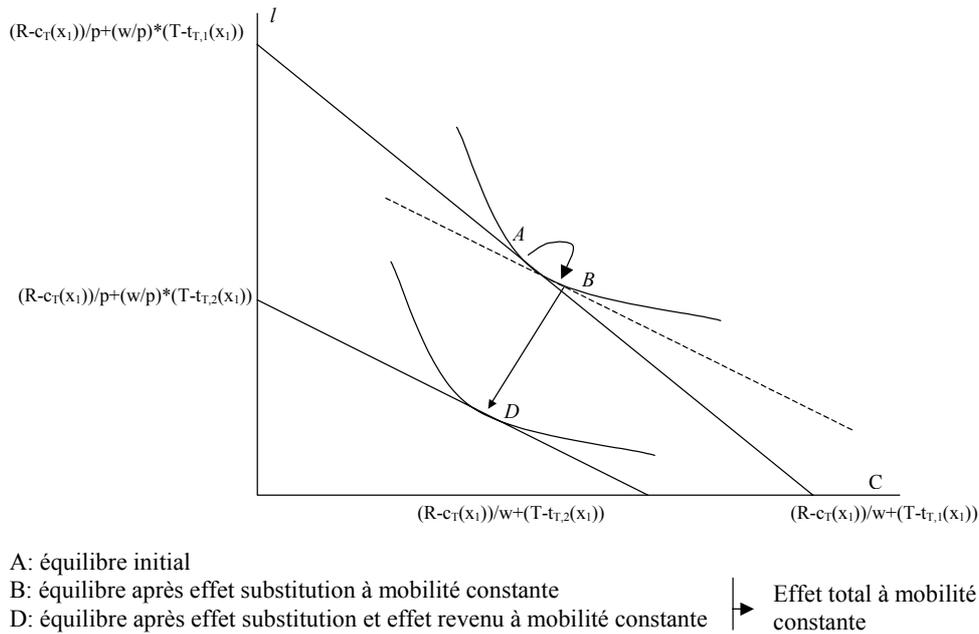


FIG. 2-1 – Effets d’une augmentation du temps de transport à demande de mobilité donnée.

tion du niveau de loisir¹ qui doit être compensé par une augmentation du niveau de consommation afin de rétablir l’équilibre du consommateur, défini dans l’équation (2.6), à niveau d’utilité constant. L’équilibre passe de *A* en *B*. A cet effet de substitution est associé un effet revenu, tel que l’augmentation du temps total de transport diminue le pouvoir d’achat du loisir et de la consommation par une diminution du revenu total disponible pour leur usage. Les niveaux de loisir et de consommation optimaux diminuent. Le niveau d’utilité totale diminue, et l’équilibre passe de *B* en *D*. Une augmentation du coût total de transport implique des effets de substitution et de revenu similaires. La seule différence porte sur le sens de l’effet substitution entre consommation et loisir.

La fonction d’utilité indirecte conditionnelle à une demande de mobilité x et une offre de transport (t_T, c_T) donnée exprime le niveau maximal d’utilité que peut atteindre le consommateur pour des niveaux de prix w et p donnés, et pour des

¹Nous pensons ici implicitement que l’augmentation du temps de transport affecte avant tout le niveau de loisir.

ressources exogènes budgétaires R et temporelle T données :

$$U_S(C^*, l^*) = V_S(R - c_T(x_T), T - t_T, w, p, x_T). \quad (2.9)$$

La quantité optimale de mobilité de l'individu, notée x^* , est solution du programme

$$\max_x V_S(R - c_T(x), T - t_T(x), p, w) + W(x) \quad (2.10)$$

et, en notant $W'_x(x) \equiv \frac{\partial W(x)}{\partial x}$, $V'_{S,x} = \frac{\partial V_S(R - c_T(x), T - t_T(x), p, w)}{\partial x}$, conduit à la condition du premier ordre suivante :

$$W'_x(x^*) = \frac{\partial V_S(R - c_T(x^*), T - t_T(x^*), p, w)}{\partial c_T} \frac{dc_T(x^*)}{dx^*} + \frac{\partial V_S(R - c_T(x^*), T - t_T(x^*), p, w)}{\partial t_T} \frac{dt_T(x^*)}{dx^*} \quad (2.11)$$

L'utilité marginale de la mobilité est égale à la perte marginale d'utilité sur la consommation et le loisir induite par les coût marginaux en budget et en temps de transport. Cette condition d'optimalité peut s'écrire en fonction des demandes conditionnelles de consommation et loisir, de façon à faire apparaître de façon explicite les taux marginaux de substitution entre mobilité et consommation, et mobilité et loisir :

$$W'_x(x^*) + U'_{SC}(C^*, l^*) \left(\frac{\partial C^*(R - c_T(x^*), T - t_T(x^*), p, w)}{\partial c_T} \frac{dc_T(x^*)}{dx^*} + \frac{\partial C^*(R - c_T(x^*), T - t_T(x^*), p, w)}{\partial t_T} \frac{dt_T(x^*)}{dx^*} \right) + U'_{Sl}(C^*, l^*) \left(\frac{\partial l^*(R - c_T(x^*), T - t_T(x^*), p, w)}{\partial c_T} \frac{dc_T(x^*)}{dx^*} + \frac{\partial l^*(R - c_T(x^*), T - t_T(x^*), p, w)}{\partial t_T} \frac{dt_T(x^*)}{dx^*} \right) = 0 \quad (2.12)$$

$\frac{\partial C^*(R - c_T(x^*), T - t_T(x^*), p, w)}{\partial c_T}$ est la variation de la demande optimale de consommation causée par une variation du coût total de transport. De même, $\frac{\partial C^*(R - c_T(x^*), T - t_T(x^*), p, w)}{\partial t_T}$ est la variation de la demande optimale de consommation suite à une variation du temps total de transport. Les interprétations sont similaires pour la variable loisir. $\frac{dc_T(x^*)}{dx^*}$ est la variation du coût total de transport suite à l'augmentation marginale de la demande de mobilité, et $\frac{dt_T(x^*)}{dx^*}$ est la variation du temps total de transport suite à cette même augmentation marginale de mobilité. La condition du premier ordre établie par l'équation (2.12) peut être réécrite en terme de rapport de taux

marginaux de substitution entre consommation, loisir, et mobilité :

$$\frac{W'_x(x^*)}{U'_{Sl}(C^*, l^*)} = -\frac{p}{w} \left(\begin{aligned} & \frac{\partial C^*(R-c_T(x^*), T-t_T(x^*), p, w)}{\partial c_T} \frac{dc_T(x^*)}{dx^*} \\ & + \frac{\partial C^*(R-c_T(x^*), T-t_T(x^*), p, w)}{\partial t_T} \frac{dt_T(x^*)}{dx^*} \end{aligned} \right) \\ - \left(\begin{aligned} & \frac{\partial l^*(R-c_T(x^*), T-t_T(x^*), p, w)}{\partial c_T} \frac{dc_T(x^*)}{dx^*} \\ & + \frac{\partial l^*(R-c_T(x^*), T-t_T(x^*), p, w)}{\partial t_T} \frac{dt_T(x^*)}{dx^*} \end{aligned} \right), \quad (2.13)$$

et

$$\frac{W'_x(x^*)}{U'_{Sc}(C^*, l^*)} = - \left(\begin{aligned} & \frac{\partial C^*(R-c_T(x^*), T-t_T(x^*), p, w)}{\partial c_T} \frac{dc_T(x^*)}{dx^*} \\ & + \frac{\partial C^*(R-c_T(x^*), T-t_T(x^*), p, w)}{\partial t_T} \frac{dt_T(x^*)}{dx^*} \end{aligned} \right) \\ - \frac{w}{p} \left(\begin{aligned} & \frac{\partial l^*(R-c_T(x^*), T-t_T(x^*), p, w)}{\partial c_T} \frac{dc_T(x^*)}{dx^*} \\ & + \frac{\partial l^*(R-c_T(x^*), T-t_T(x^*), p, w)}{\partial t_T} \frac{dt_T(x^*)}{dx^*} \end{aligned} \right). \quad (2.14)$$

Le taux marginal de substitution mobilité-consommation de l'équation (2.14) est égal à la somme entre la variation totale de la consommation transitant par les fonctions de coût et temps de transport et la variation totale du loisir, transitant par les fonctions de coût et temps de transport, exprimée en termes de consommation. Le gain marginal de la mobilité exprimé en termes de consommation est égal à la perte marginale du pouvoir d'achat sur la consommation et le loisir, exprimé en termes de consommation. L'interprétation est symétrique pour le taux marginal de substitution mobilité-loisir de l'équation (2.13) : il est égal à la somme entre la variation totale de la consommation transitant par les fonctions de coût et temps de transport, exprimée en termes de loisir, et la variation totale du loisir, transitant par les fonctions de coût et temps de transport. Le gain marginal de la mobilité exprimé en termes de loisir est égal à la perte marginale du pouvoir d'achat sur la consommation et le loisir, exprimé en termes de loisir.

La fonction de demande optimale de mobilité dépend du revenu exogène, de la ressource totale en temps, du salaire horaire, du niveau des prix de la consommation, d'un vecteur de paramètres de la fonction d'offre de temps de trajet, noté \bar{t}_T , et d'un vecteur de paramètres associés au mécanisme de tarification du marché des transports, noté \bar{c}_T :

$$x^* = x^*(R, T, w, p, \bar{t}_T, \bar{c}_T). \quad (2.15)$$

Pour cette demande de mobilité optimale, les niveaux de consommation et loisir optimaux sont obtenus en reprenant les fonctions de demandes conditionnelles définies

dans l'équation (2.8), en introduisant le niveau optimal de mobilité. Nous notons ces demandes optimales :

$$\begin{aligned} C^* &= C^*(R, T, w, p, \bar{t}_T, \bar{c}_T), \\ l^* &= l^*(R, T, w, p, \bar{t}_T, \bar{c}_T). \end{aligned} \tag{2.16}$$

L'utilité indirecte du consommateur de caractéristiques S , disposant d'un revenu exogène R et d'une ressource totale en temps T , pour des conditions de prix données sur les marchés du travail, de la consommation, et du transport, et pour des caractéristiques technologiques données sur le marché du transport, prend la forme suivante :

$$U_S(C^*, l^*) + W_S(x^*) = \tilde{V}_S(R, T, \bar{c}_T, \bar{t}_T, w, p). \tag{2.17}$$

Une modification des conditions d'offre sur le marché des transports, soit un changement de la fonction de coût c_T , soit un changement de la fonction d'offre de temps t_T , engendre des effets supplémentaires liés à l'ajustement de la demande de mobilité. A mobilité constante, nous observons une diminution de la consommation et du loisir lorsque le coût ou le temps de transport augmente. L'ajustement de la demande de mobilité compense en partie ces diminutions.

Quatre effets sont à remarquer lorsque les conditions de transport c_T, t_T sont modifiées. Les deux premiers sont l'effet substitution et l'effet revenu à demande de mobilité constante. Les deux derniers effets sont un effet substitution et un effet revenu liés à l'ajustement de la demande de mobilité. Supposons une augmentation du temps de total de transport : pour un même niveau de mobilité, l'individu doit allouer plus de temps à ses déplacements. A demande de mobilité donnée, la pente de la contrainte budget temps pesant sur les niveaux de consommation et loisir se modifie. La diminution de la ressource en temps disponible pour la consommation et le loisir engendre un effet substitution à niveau d'utilité et demande de mobilité constants (passage de A à B) : le temps de loisir diminue et l'individu augmente sa consommation de façon à rétablir l'équilibre à ce niveau d'utilité, c'est-à-dire de façon à égaliser le gain marginal et coût marginal établi dans l'équation (2.6). L'augmentation du temps de transport diminue le pouvoir d'achat total de l'individu à mobilité constante : il demande moins de loisir et consommation, et son niveau d'utilité diminue. Cet effet revenu est représenté par le changement d'équilibre de B en D . L'effet total est tel qu'à mobilité constante, l'individu diminue son niveau de

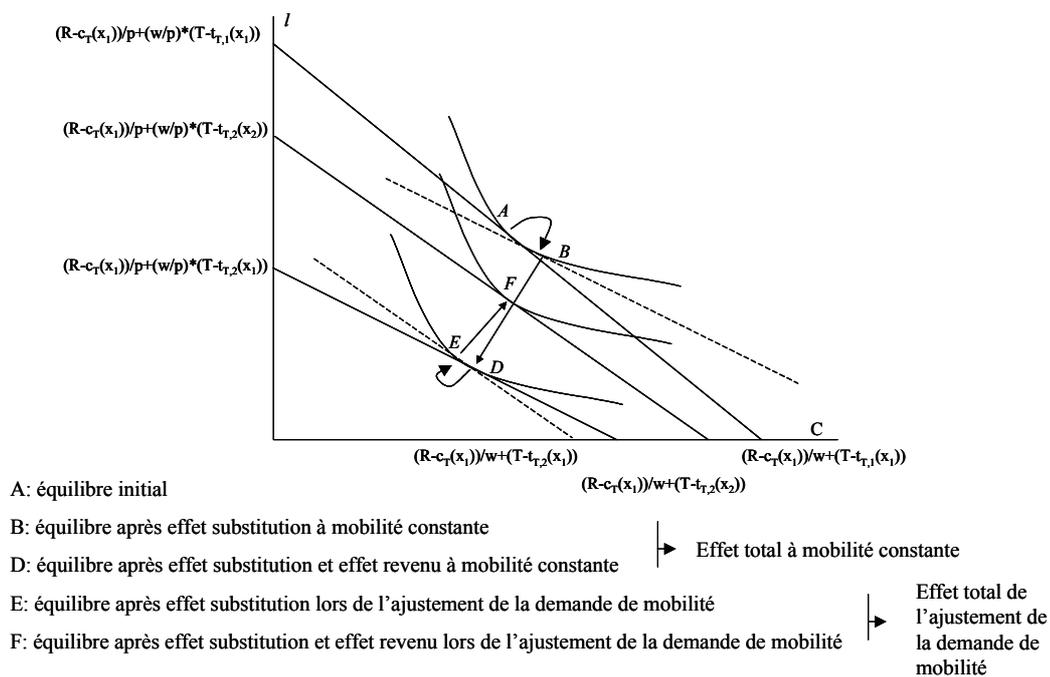


FIG. 2-2 – Effets d’une augmentation du temps de transport à demande de mobilité endogène.

loisir et sa consommation. L’effet sur l’utilité est négatif. La demande de mobilité est déterminée de façon endogène suite à l’augmentation du temps de transport. Pour les nouveaux niveaux d’équilibre en consommation et loisir, et pour le niveau initial de mobilité, l’ajustement auquel va procéder l’individu est constitué d’un effet substitution (passage de D à E) et d’un effet revenu (passage de E à F), qui dépendent des conditions (2.14) et (2.13). La somme de tous les effets est indéterminée. L’intuition suggère qu’elle soit négative, et nous raisonnerons avec cet a priori.

2.1.4 Choix de transport.

L’individu cherche son équilibre entre consommation, loisir et mobilité. Il organise dans l’espace et le temps les déplacements correspondants. Cette organisation donne lieu à l’utilisation du marché du transport. Pour ses demandes optimales de consommation, loisir et mobilité, l’individu fait face à une variété de modalités d’organisation à court terme de ses déplacements. L’offre sur le marché des trans-

ports est différenciée : il existe plusieurs fonctions d’offre tarifaires et technologiques pour une même demande de mobilité. Sur le marché du transport, l’individu n’a pas accès à un continuum d’offres pour satisfaire les déplacements associés à sa demande optimale de mobilité. Chaque possibilité pour la réalisation des déplacements associés aux demandes optimales se caractérise dans notre approche par une offre technologique fixant un montant d’allocation de temps et une fonction de tarification correspondante aux conditions d’utilisation de l’alternative de transport. A demande de mobilité donnée, c’est-à-dire pour une fréquence de déplacement et une quantité de distance à parcourir, une alternative de transport se caractérise par le choix de destinations dans l’espace, et par conséquent le choix de modes de transport, le choix d’itinéraires et horaires sur les réseaux de transport. C’est le croisement de tout ces choix qui conditionne les fonctions d’offre tarifaires et technologiques à laquelle fait face le consommateur. Nous notons cet ensemble, supposé fini,

$$\mathcal{D} := \{(t_{T,1}, c_{T,1}), \dots, (t_{T,m}, c_{T,m}), \dots, (t_{T,M}, c_{T,M})\}. \quad (2.18)$$

\mathcal{D} décrit toutes les offres de transport envisageables pour l’organisation de ses déplacements associés à ses activités de consommation, loisirs et travail : le niveau du capital automobile, la fréquence des déplacements, les différentes destinations des activités, les modes de transport, les itinéraires et horaires des trajets interviennent² dans la description de \mathcal{D} .

La fonction tarifaire est différenciée selon les choix de localisations pour la réalisation des activités de loisir (et travail) et consommation, selon les choix de possession d’un ou plusieurs véhicules motorisés (principalement la voiture), selon les modes de transports, selon les différents itinéraires qui sont utilisés à différents horaires. Pour l’automobile, le coût total de la mobilité est composé du coût de possession d’un niveau de capital automobile souhaité (amortissement du coût d’acquisition et assurance) et du coût d’usage de ce capital (essence et entretien) proportionnel à la demande de mobilité souhaitée. Le niveau de capital automobile du ménage dépend essentiellement de sa richesse, du choix de sa localisation résidentielle et des gains en coût et temps de transport qu’il permet. Le coût par unité de mobilité dépend des itinéraires et horaires de déplacement de l’individu : c’est une fonction des distances parcourues, des capacités de circulation sur les itinéraires et de leur charge

²Voir McFadden(1975).

à différents horaires. Pour les transports en commun, le coût de transport dépend des mécanismes de tarification opérés par les gestionnaires du réseau : par durée de circulation sur le réseau, par zones de circulation, par trajet, par abonnements³.

L'offre de temps de transport pour un mode de transport dépend principalement des itinéraires et de horaires de circulation choisis par l'individu. Selon, la distance à parcourir et les capacités de circulation détermine la vitesse de circulation de l'individu. L'horaire détermine la charge des itinéraires : en présence de congestion les vitesses de circulation diminuent. Pour les transports en commun, nous soulignons que le temps total de transport dépend du temps d'accès au point d'entrée et sortie de l'itinéraire sur le réseau, du nombre de correspondance sur ce dernier déterminant les temps de connexions entre les différents arcs du parcours, et de l'horaire du déplacement conditionnant les fréquences de passage du moyen de transport.

Pour chaque possibilité $(t_{T,m}, c_{T,m})$, R, T, w, p étant donnés, les niveaux des demandes de consommation, de loisir et de mobilité optimale sont différents : ils dépendent des paramètres $\bar{c}_{T,m}, \bar{t}_{T,m}$ des fonctions de coût et temps de l'alternative de transport. Nous les notons (C_m^*, l_m^*, x_m^*) . Ils conduisent à des niveaux d'utilité différents pour l'équilibre du consommateur, que nous notons $\tilde{V}_{S,m} = U_S(C_m^*, l_m^*, x_m^*)$. Pour un ensemble \mathcal{D} donné, il choisit sur son chemin d'expansion le contrat de transport qui maximise son niveau d'utilité :

$$(t_{T,m^*}, c_{T,m^*}) = \arg \max_{(t_{T,m}, c_{T,m}) \in \mathcal{D}} \left(\tilde{V}_{S,m} \right). \quad (2.19)$$

Les demandes optimales C^* et l^* induites par ce choix sont telles que :

$$\begin{aligned} C^* &= C^*(R, T, \bar{c}_{T,m^*}, \bar{t}_{T,m^*}, w, p), \\ l^* &= l^*(R, T, \bar{c}_{T,m^*}, \bar{t}_{T,m^*}, w, p). \end{aligned} \quad (2.20)$$

Le niveau d'utilité finale est

$$\tilde{V}_S(R, T, \bar{c}_{T,m^*}, \bar{t}_{T,m^*}, w, p). \quad (2.21)$$

³Le principe de l'abonnement consiste à imposer un coût fixe à l'acquisition d'un titre de transport permettant de circuler librement et sans contraintes de quantités sur le réseau pendant une durée donnée dans le contrat d'abonnement.

Notre cadre reste très général pour l'analyse de la demande de transport. Dénumérer, pour une demande de mobilité et des demandes de loisir et consommation dans l'espace et le temps, toutes les possibilités de transport consécutives conduit à des ensembles de choix non gérables d'un point de vue opérationnel. Certaines hypothèses additionnelles facilitant l'étude des choix de transport doivent être énoncées lorsque nous souhaitons préciser les interactions entre les différents facteurs constitutifs de la demande de transport (localisations, modes de transports, itinéraires et horaires des déplacements) et leurs influences sur le choix final du consommateur. Les approches sont nombreuses, et ont beaucoup évoluées durant les cinq dernières décennies. Pour nos applications ultérieures, nous souhaitons nous intéresser à l'organisation d'un unique déplacement, pour une demande de mobilité donnée, associée à un motif d'activité donné. Bien que moins réaliste qu'une approche fondée sur l'analyse directe d'un calendrier de plusieurs activités, la démarche que nous utilisons a le mérite d'être plus parcimonieuse sans changer les propriétés théoriques du modèle général. Elle permet d'identifier plus aidément les différentes composantes de la demande de transport associées à un déplacement. Nous présentons les restrictions nécessaires à la stabilité et l'interprétation de cette analyse par motif de déplacement.

2.1.5 L'analyse du choix du mode de transport pour un déplacement.

Dans un cadre d'analyse de la demande de transport par motif de déplacement, nous supposons que l'individu souhaite réaliser J types distincts d'activités. A chacune d'entre elle est associée une demande de mobilité, pour laquelle l'individu doit organiser dans l'espace et le temps le déplacement associé. Fréquence, destinations, modes de transport, itinéraires et horaires sont des décisions relatives à cette planification. Elles dépendent de facteurs qui ne sont pas propres au motif de déplacement : localisation résidentielle, niveau de capital automobile permettant de produire une partie de la mobilité du ménage. Pour des activités primantes, par exemple le travail, le choix de la destination ne se pose pas. A court terme, la demande de mobilité pour ce motif est donnée, et l'individu cherche la combinaison mode-itinéraire-horaire qui lui semble la plus adaptée. Pour notre analyse, l'ajustement de la demande totale de mobilité ne passe pas par la réorganisation de la demande de transport associée aux activités primaires, dont les niveaux demandes

optimaux sont révisées à plus long terme que la demande de mobilité quotidienne.

Lorsque nous nous focalisons sur un motif particulier, nous devons préciser les hypothèses relatives à la stabilité et l'interprétation du cadre d'analyse. Nous supposons la condition (2) vérifiée. Nous reprenons l'utilité indirecte de l'individu définie dans l'équation (2.17). Nous supposons la condition suivante satisfaite.

Condition 3 *La fonction de coût total de transport est séparable par motif de déplacement.*

Le coût total de déplacement est défini comme la somme d'un coût fixe partagé par tous les motifs de déplacement et d'une somme de coûts dépendant de la demande de mobilité propre à chaque motif $j = 1, \dots, J$:

$$c_T(x) = \bar{z}_T + \sum_{j=1}^J c_{T,j}(x_j), \quad (2.22)$$

Le coût fixe \bar{z}_T caractérise les coûts de long terme liés à l'assurance, l'entretien et le renouvellement du capital automobile du ménage dans lequel l'individu vit. Il s'agit des coûts fixes de production de la mobilité prise en charge par le ménage. Le coût de transport propre à un motif dépend des conditions de réalisation du déplacement associé à ce motif. Il est représenté par un coût propre à la demande de mobilité pour ce motif, noté $c_{T,j}(x_j)$. Pour une demande de mobilité donnée pour le motif j , les coûts par unité de mobilité dépendent principalement des modes de transport, itinéraires et des horaires auxquels ils sont associés. Nous soulignons que les coûts du trajet en transports en commun dépendent aussi des mécanismes de tarification choisis par les gestionnaires du réseau. Nous supposons aussi pouvons aussi séparer l'offre technologique par motif.

Condition 4 *Le temps total de transport associée à la demande totale de mobilité est la somme des temps de transport pour la demande de mobilité associée chaque motif :*

$$t_T(x) = \sum_{j=1}^J t_{T,j}(x_j) \quad (2.23)$$

Nous rappelons que pour chaque mode de transport accessible pour satisfaire une demande de mobilité donnée pour le motif j , l'itinéraire et l'horaire du déplacement conditionnent le temps du trajet. Pour le réseau routier, selon l'itinéraire, la distance à parcourir et les capacités de circulation détermine la vitesse de circulation de l'individu, et l'horaire détermine la charge des itinéraires : en présence de congestion

les vitesses de circulation diminuent. Pour les transports en commun, le temps total de transport dépend du temps d'accès au point d'entrée et sortie de l'itinéraire sur le réseau, du nombre de correspondances sur ce dernier déterminant des temps de connexions et d'attente entre les différents arcs du parcours, et de l'horaire du déplacement conditionnant les fréquences de passage du moyen de transport.

Nos deux conditions (3) et (4) imposent une structure séparable par motif j de l'offre de transport. Le consommateur distingue pour chaque motif de déplacement l'ensemble des modalités (localisations, modes de transports, itinéraires et horaires des déplacements) qu'il peut envisager : le coût total de transport résulte de la somme d'un coût lié au capital automobile du ménage et de la somme des coûts propres à chaque motif. Le temps total de transport résulte de la somme des temps de transport pour chaque motif. Sous ces deux conditions supplémentaires, la fonction d'utilité indirecte peut s'écrire :

$$\begin{aligned} \tilde{V}_S(R, T, \bar{c}_T, \bar{t}_T, w, p) \\ = \tilde{V}_S(R, T, \bar{z}_T, \bar{c}_{T,1}, \dots, \bar{c}_{T,J}, \bar{t}_{T,1}, \dots, \bar{t}_{T,J}, w, p). \end{aligned} \quad (2.24)$$

Les deux conditions suivantes spécifient plus précisément les restrictions associées au cadre d'analyse de la demande déplacements par motifs.

Condition 5 *Les préférences du consommateur sont séparables par motif de déplacement.*

C'est une hypothèse propre à l'analyse de la demande de transport par motif de transport. Elle permet de concevoir la demande de transport comme une somme de demandes de mobilité associées à différents motifs $j = 1, \dots, J$. L'utilité indirecte du consommateur peut s'écrire sous cette condition supplémentaire :

$$\begin{aligned} \tilde{V}_S(R, T, \bar{z}_T, \bar{c}_{T,1}, \dots, \bar{c}_{T,J}, \bar{t}_{T,1}, \dots, \bar{t}_{T,J}, w, p) \\ = \sum_{j=1}^J \tilde{W}_S(R, T, w, p, \bar{t}_{T,j}, \bar{c}_{T,j}, \bar{z}_T) \end{aligned} \quad (2.25)$$

Il s'agit de l'hypothèse restrictive de notre approche. La demande de transport pour un motif domicile-travail est définie indépendamment des demandes de transport pour les autres motifs. Nous excluons toutes les interactions spatiales et temporelles dans l'organisation de la demande de transport, ainsi que leurs interactions avec les niveaux de demandes des activités correspondantes. Nous ne modélisons pas

explicitement l'enchaînement des activités dans l'espace et le temps, et nous supposons que la demande de mobilité pour chacune d'entre elles peut être modélisée séparément.

Lorsque nous nous focalisons sur l'activité travail, notée tr , l'utilité indirecte peut être écrite :

$$\begin{aligned} \tilde{V}_S(R, T, \bar{z}_T, \bar{c}_{T,1}, \dots, \bar{c}_{T,J}, \bar{t}_{T,1}, \dots, \bar{t}_{T,J}, w, p) = \\ A\left(R, T, \{c_{T,j}\}_{j \neq tr}, \{t_{T,j}\}_{j \neq tr}, w, p, \bar{z}_T\right) + \tilde{W}_S^{tr}(R, T, w, p, \bar{t}_T^{tr}, \bar{c}_T^{tr}, \bar{z}_T) \end{aligned} \quad (2.26)$$

Pour ce motif de déplacement, à demande de mobilité donnée, l'individu doit choisir son mode de transport, son itinéraire et horaire de circulation sur les réseaux correspondants. Nous nous plaçons dans un contexte de court terme, où l'origine et la destination sont prédéterminées⁴, ainsi que le niveau du capital automobile du ménage auquel l'individu appartient. Selon le croisement de ses choix, il consomme des vecteurs $\bar{t}_T^{tr}, \bar{c}_T^{tr}$ pour assurer sa demande de mobilité. Pour notre application ultérieure, nous souhaitons nous intéresser au choix du mode de transport indépendamment des autres choix de transport associés au déplacement domicile-travail. Nous devons supposer la condition suivante vérifiée.

Condition 6 *L'individu est à l'équilibre sur ses choix de transport autres que le mode de transport pour le motif étudié.*

Cette condition rend exogène un certain nombre de décisions relatives à l'organisation des déplacements associés à la demande de mobilité. La localisation du lieu de travail est connue. La localisation résidentielle, ainsi que le niveau du capital automobile du ménage est supposé prédéterminé de façon optimale. Les choix d'itinéraires et horaires sont supposés être résolus de façon optimale selon certaines règles de décision : chemin le plus court, chemin le plus rapide, équilibre de Wardrop(1952) pour les choix d'itinéraires, et fonction de coût de déshorage pour les choix horaires, voir par exemple Vickrey(1969), Small(1982), de Palma et Marshall(1996). Seul le choix du mode de transport reste variable à court terme. Il influence les choix des itinéraires et horaires du déplacement. Nous soulignons que ces choix qui

⁴Il est possible de concevoir un travailleur se déplaçant à plusieurs destinations pour son activité de travail, partant et revenant à une origine donnée. Dans ce cas, sa demande de transport considère le nombre de tournées de déplacements, les modes de transports utilisés, les horaires et itinéraires des trajets sur les réseaux correspondants.

sont prédéterminés induisent des effets sur l'offre de temps de transport et son coût, qui influencent à leur tour le choix du mode de transport. Pour notre application présentée plus avant, il conviendra de mesurer la contribution de ces choix sur l'importance qu'accorde l'individu aux caractéristiques de l'offre pour le choix de son mode de transport.

2.2 Les valeurs du temps de transport.

2.2.1 Motivations.

Les opérateurs de transport et les institutions publiques en charge du contrôle et de l'exploitation des réseaux de circulation sont conscients de la nécessité d'entretenir les facilités de déplacement compte tenu de leur influence sur l'équilibre allocatif de l'individu et son niveau de bien-être. Pour ce, différents types de politiques sont mises en place, de l'investissement en infrastructures de transport⁵ jusqu'aux politiques de segmentation de la demande conduisant à la diversité et la concurrence des offres pour un même trajet. Toutes choses égales par ailleurs, circuler plus rapidement est profitable au consommateur, mais s'il y a modification des contrats de déplacement sur le marché des transports, alors nous ne pouvons rien conclure sur l'équilibre futur entre offre et demande d'activités et transports. Le planificateur souhaite que le bien-être soit au moins le même, sinon mieux.

Le transport, activité peu génératrice de bien-être pour l'utilisateur, consomme à la fois des ressources en temps et en budget, et la rapidité de circulation sur un réseau est primordiale. La notion de fluidité sur un réseau est étroitement liée à la durée des trajets qui sont réalisés. Perdre le moins de temps possible dans les déplacements est un objectif rationnel pour l'utilisateur. Lorsque le besoin d'accroître les capacités des réseaux se fait sentir, nous devons être en mesure d'évaluer le bénéfice que peut en retirer la population de voyageurs, et celui qu'en retire la communauté entière (firmes, institutions et voyageurs). Dès lors, évaluer la propension à payer d'un individu pour économiser de la ressource en temps lors du trajet est équivalente à évaluer la variation de prix ex post à la politique de transport, permettant en partie

⁵La contrainte budgétaire peut être atteinte par des politiques économiques. La ressource en temps est invariante pour un cycle de longueur donnée. C'est sur l'allocation de temps superflue, c'est-à-dire le montant de temps qui pourrait être économisé, que l'effort doit être porté afin que les ressources restantes des voyageurs puissent être rentabilisées.

son financement, augmentant la fluidité des réseaux, et conservant le même niveau de bien-être pour l'utilisateur.

L'estimation de la distribution des valeurs du temps de transport d'une population est une mesure cruciale pour les institutions publiques afin de pouvoir assurer un arbitrage satisfaisant assurant une diminution des temps de parcours pour le plus grand nombre de voyageurs par un financement adéquat ne modifiant pas leurs niveaux de bien-être. Dans le contexte du choix du mode de transport, la valeur du temps est un paramètre clé dans l'évaluation de projets à long terme concernant le développement des infrastructures de transport : développement de modes de transport alternatifs à la voiture, développement de voies réservées au covoiturage, incitation à l'usage des transports en commun,....

Nous ne prétendons pas être exhaustif quant à la description de toutes les propriétés de la valeur du temps de transport pour un individu. Nous souhaitons présenter celles qui nous semblent le plus en accord avec notre analyse des déplacements réguliers domicile-travail, en milieu urbain. Les rapports MVA(1987), HCG(1990) décrivent les nombreuses causes de la valeur monétaire du temps de transport dans un contexte plus général. Nous soulignerons les limites de nos interprétations plus avant.

2.2.2 Définition.

Le concept de valeur économique du temps a été initialement introduit par Beesley (1965) et Becker (1965), mais aussi Tipping (1968) et de Serpa (1971) qui l'ont développé dans le cadre général de la théorie de l'allocation du temps en présence de contraintes technologiques. La valeur du temps de transport est un taux marginal de substitution établi à l'optimum allocatif du voyageur, prix qu'il est prêt à payer pour économiser ce temps qu'il considère comme superflu à niveau d'utilité constant. Nous reprenons la formulation initiale de la fonction d'utilité indirecte établie dans l'équation (2.17). Nous supposons qu'une augmentation du temps de transport a un effet total négatif. La variation de l'utilité suite à une variation des paramètres de la fonction d'offre de temps total et de la fonction de tarification de l'utilisation du réseau de transport est donnée par

$$d\tilde{V}_S(R, T, \bar{c}_T, \bar{t}_T, w, p) = \frac{\partial \tilde{V}_S(R, T, \bar{c}_T, \bar{t}_T, w, p)}{\partial \bar{c}_T} d\bar{c}_T + \frac{\partial \tilde{V}_S(R, T, \bar{c}_T, \bar{t}_T, w, p)}{\partial \bar{t}_T} d\bar{t}_T \quad (2.27)$$

Definition 1 *La valeur du temps de transport est définie par le consentement à payer pour épargner du temps de transport, à niveau d'utilité constant. Il s'agit de la variation du coût \bar{c}_T nécessaire à la stricte compensation de la variation de l'utilité induite par une modification du temps \bar{t}_T . Elle est égale au taux marginal de substitution entre temps et coût de transport :*

$$\pi(R, T, \bar{c}_T, \bar{t}_T, w, p) = \frac{d\bar{c}_T}{d\bar{t}_T} = -\frac{\frac{\partial \tilde{V}_S}{\partial \bar{t}_T}}{\frac{\partial \tilde{V}_S}{\partial \bar{c}_T}}(R, T, \bar{c}_T, \bar{t}_T, w, p). \quad (2.28)$$

La valeur économique du temps alloué au transport, se définit comme la propension d'un individu à payer pour se débarrasser de celui-ci et conserver le même bien-être. Il s'agit de la valorisation monétaire de la dernière unité de temps allouée au transport, établie relativement au niveau d'utilité optimal. A son équilibre, si modification de la durée d'un parcours donné il y a, l'individu sera alors capable d'évaluer la perte de satisfaction qu'elle engendre et ainsi valoriser le prix qu'il est prêt à payer pour éviter cette situation et maintenir le même niveau de bien-être, toutes choses égales par ailleurs.

Nous supposons vérifiées les inégalités suivantes pour la suite de notre exposé

$$\frac{\partial \tilde{V}_S}{\partial \bar{t}_T}(R, T, \bar{c}_T, \bar{t}_T, w, p) < 0, \quad \frac{\partial \tilde{V}_S}{\partial \bar{c}_T}(R, T, \bar{c}_T, \bar{t}_T, w, p) < 0, \quad (2.29)$$

et

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 \tilde{V}_S}{\partial \bar{t}_T \partial R}(S, R, T, \bar{c}_T, \bar{t}_T, w, p) &\geq 0, \\ \frac{\partial^2 \tilde{V}_S}{\partial \bar{c}_T \partial R}(S, R, T, \bar{c}_T, \bar{t}_T, w, p) &\geq 0, \\ \frac{\partial^2 \tilde{V}_S}{\partial \bar{t}_T \partial \bar{c}_T}(S, R, T, \bar{c}_T, \bar{t}_T, w, p) &\leq 0. \end{aligned} \quad (2.30)$$

Les conditions du premier ordre en (2.29) énoncent qu'une augmentation du temps de transport ou de son coût diminue son niveau total d'utilité. Les conditions du second ordre en (2.30) énoncent que la diminution de l'utilité suite à une augmentation du temps de transport ou de son coût est moins importante lorsque le niveau de richesse initial est plus grand, et que l'amplitude de la diminution de l'utilité suite à une augmentation du coût de transport s'accroît avec la durée de transport.

2.2.3 Propriétés.

La valeur du temps possèdent de nombreuses caractéristiques. Différencier la propension à payer pour l'épargne de temps de transport selon différents motifs d'activité est une démarche devenue aujourd'hui conventionnelle. En général, cinq groupes d'activités sont distingués : les activités de subsistance, telles dormir, manger ; les activités mandataires, souvent reliées au ménage, telles les activités domestiques, faire les courses, s'occuper des enfants ; les activités primaires, telles le travail ou l'éducation scolaire et/ou professionnelle ; les activités somptuaires, par exemple les activités récréationnelles. Selon la nature de l'activité à réaliser à destination, les contraintes organisationnelles sous-jacentes sont plus ou moins flexibles. La perception des caractéristiques du marché des transport est différente. La valeur du temps de transport en résultant est différente. Le rapport Boiteux(2001) reporte de nombreuses valeurs pour différents motifs, utilisées par différents opérateurs de transport dans leurs modèles de transport en milieu urbain. Le modèle développé par Ben-Akiva et Ruitter(1973) pour la Metropolitan Transportation Commission de Californie (Etats-Unis) repose sur une analyse des choix de déplacements pour différents motifs. Les valeurs du temps obtenues sont très différentes selon ces derniers. Un résultat commun à tous ces modèle est la corrélation positive entre la valorisation du temps de transport et l'importance de l'activité à réaliser à destination. Plus elle est centrale dans le cycle de vie de l'individu, plus la valeur du temps de transport associé est importante. Nous soulignons que pour les activités primaires et mandataires, l'inflexibilité des contraintes calendaires joue un rôle d'amplification de la valeur du temps.

Caractéristiques du consommateur et de son ménage.

Prenons deux individus devant effectuer le même trajet dans les mêmes conditions : pourquoi devraient ils avoir la même propension à payer pour l'économie de temps sur le parcours ? Par cette simple question est posée la problématique de l'influence des caractéristiques S de l'individu sur sa valorisation du temps alloué à son activité de transport pour son déplacement domicile-travail. L'influence de la structure du ménage dans lequel il vit, l'influence de sa catégorie socioprofessionnelle (même si celle-ci est fortement corrélée au revenu, elle doit être considérée indépendamment car elle peut représenter en partie l'hétérogénéité des cycles de vies présents dans une population), l'influence de son âge, etc... sont certaines et condi-

tionnent ses préférences. Les travaux à ce sujet établissent de nombreux résultats.

L'impact du niveau de la richesse initiale du ménage est un déterminant pouvant être affecté directement par les politiques économiques. Son impact sur la valorisation du temps de transport est positif.

Proposition 7 *La variation de la valeur du temps de transport suite à une modification du revenu exogène est positive :*

$$\begin{aligned} \pi'_R(S, R, T, \bar{c}_T, \bar{t}_T, w, p) = \\ \frac{\frac{\partial^2 \tilde{V}_S}{\partial t_T \partial R}}{\frac{\partial \tilde{V}_S}{\partial c_T}}(R, T, \bar{c}_T, \bar{t}_T, w, p) + \pi \frac{\frac{\partial^2 \tilde{V}_S}{\partial c_T \partial R}}{\frac{\partial \tilde{V}_S}{\partial c_T}}(R, T, \bar{c}_T, \bar{t}_T, w, p) \geq 0. \end{aligned} \quad (2.31)$$

Déjà mis en évidence par McFadden et Train(1978), McFadden(2000), de Palma et Kilani(1999), Waters(1994), la propension à payer l'économie de temps de voyage est une fonction croissante du revenu net des frais de transport. Les individus disposant de ressources budgétaires plus conséquentes ont une propension à payer pour l'économie de temps plus élevée que les travailleurs à revenus moindres. Leur pouvoir d'achat du temps est plus important. Une augmentation du revenu exogène de l'individu augmente la somme des amplitudes de l'effet substitution entre la mobilité et la consommation et le loisir et l'effet revenu pour une demande de mobilité donnée.

Caractéristiques de l'offre de transport.

Le consentement à payer pour l'épargne de temps de transport dépend du coût fixe d'utilisation du réseau de transport \bar{c}_T .

Proposition 8 *La variation de la valeur du temps de transport suite à une augmentation du coût de transport est de signe indéterminé :*

$$\begin{aligned} \pi'_{\bar{c}_T}(S, R, T, \bar{c}_T, \bar{t}_T, w, p) = \\ \frac{\frac{\partial^2 \tilde{V}_S}{\partial t_T \partial \bar{c}_T}}{\frac{\partial \tilde{V}_S}{\partial c_T}}(R, T, \bar{c}_T, \bar{t}_T, w, p) + \pi \frac{\frac{\partial^2 \tilde{V}_S}{\partial \bar{c}_T^2}}{\frac{\partial \tilde{V}_S}{\partial c_T}}(R, T, \bar{c}_T, \bar{t}_T, w, p). \end{aligned} \quad (2.32)$$

Le sens de la variation de la valeur du temps de transport dépend du signe de $\frac{\partial^2 \tilde{V}_S}{\partial \bar{c}_T^2}(R, T, \bar{c}_T, \bar{t}_T, w, p)$. Si l'utilité est une fonction décroissante convexe du coût de transport, $\frac{\partial^2 \tilde{V}_S}{\partial \bar{c}_T^2}(R, T, \bar{c}_T, \bar{t}_T, w, p) \leq 0$, la perte marginale d'utilité augmente avec

l'accroissement du coût de transport, alors $\pi'_{\bar{c}_T}(S, R, T, \bar{c}_T, \bar{t}_T, w, p) \geq 0$: la valeur monétaire compensatrice d'une diminution de l'utilité suite à l'augmentation du temps de transport à laquelle s'associe une augmentation du coût de transport s'accroît à niveau d'utilité constant.

Lorsque nous avons $\frac{\partial^2 \tilde{V}_S}{\partial \bar{c}_T^2}(R, T, \bar{c}_T, \bar{t}_T, w, p) \geq 0$, la perte marginale d'utilité diminue avec l'accroissement du coût de transport, nous pouvons obtenir pour résultat $\pi'_{\bar{c}_T}(S, R, T, \bar{c}_T, \bar{t}_T, w, p) \leq 0$: la valeur du temps diminue avec le coût du transport.

La valeur du temps dépend aussi du niveau de la durée de transport initiale. Le consentement à payer pour épargner une unité de temps de transport n'est pas le même selon le niveau initial de l'allocation.

Proposition 9 *La variation de la valeur du temps de transport suite à une modification du temps de transport est de signe indéterminé :*

$$\pi'_{\bar{t}_T}(S, R, T, \bar{c}_T, \bar{t}_T, w, p) = \frac{\frac{\partial^2 \tilde{V}_S}{\partial \bar{t}_T}}{\frac{\partial \tilde{V}_S}{\partial \bar{c}_T}}(R, T, \bar{c}_T, \bar{t}_T, w, p) + \pi \frac{\frac{\partial^2 \tilde{V}_S}{\partial \bar{c}_T \partial \bar{t}_T}}{\frac{\partial \tilde{V}_S}{\partial \bar{c}_T}}(R, T, \bar{c}_T, \bar{t}_T, w, p). \quad (2.33)$$

Selon le signe et la valeur de $\frac{\partial^2 \tilde{V}_S}{\partial \bar{t}_T}(R, T, \bar{c}_T, \bar{t}_T, w, p)$, nous pouvons établir le signe de la variation de la valeur du temps avec la durée du trajet. Une explication peut être donné concernant l'alternance du signe de la variation de la valeur du temps en reliant les choix de transport à des contraintes horaires pesant sur les activités à organiser et réaliser. L'individu est rationnel et choisit le contrat de voyage qui lui semble le plus adapté. En particulier, il choisit l'heure de départ de son domicile afin de respecter l'horaire de début de travail imposé par le contrat qu'il a signé avec la firme l'employant. Souligné par Vickrey(1969), Small(1982, 1992), de Palma et Marshall(1996, 1998), de Palma, Khatkhat et Gupta(1997), de Palma et Rochat(1996), le travailleur est obligé de respecter cet horaire, mais en milieu urbain, la congestion présente sur les réseaux aux heures de pointe implique pour l'utilisateur de devoir s'adapter à l'usage collectif des systèmes de transports et ainsi potentiellement déplacer son horaire de départ. La congestion apparaît sous différentes formes selon les types de réseaux de transport et se traduit par un allongement des temps de trajet. L'individu part plus tôt pour arriver à une heure donnée. L'efficacité des réseaux étant moindre, les coûts et durées de voyage sont plus importants.

Nous pensons, en accord avec l'approche proposée par de Palma et Marshall(1996), que les travailleurs, dans le cadre de déplacements réguliers, ajustent par tâtonne-

ments leur horaire de départ jusqu'à trouver celui considéré comme le plus adapté. Nous pensons qu'il s'agit d'un jeu collectif non coopératif, comme l'a déjà suggéré Wardrop(1952). L'individu ne connaissant pas parfaitement l'ensemble des emplois du temps des autres résidents de la région, il doit programmer ses horaires de départ de ses points d'origine de façon à satisfaire ses contraintes d'heures d'arrivée. Mais il peut aussi très bien arriver en avance ou en retard relativement à son chacun de ses objectifs planifiés : il existe des décalages entre la programmation souhaitée et celle qui est effective. Dans la mesure où la valeur du temps exprime la propension à payer du voyageur pour économiser du temps de transport et conserver le même niveau d'utilité, et selon que l'offre de transport lui permette de respecter ses contraintes calendaires ou non, elle n'est pas la même. L'effet est différent selon le sens du désajustement par rapport à l'horaire d'arrivée à respecter. Ces coûts de déshorage s'ajoutent à la valeur de l'allocation de temps de trajet programmée : la valeur effective du temps du trajet est alors une combinaison de la valeur anticipée du temps de trajet et le coût de son ajustement à la réalité.

Lorsque toutes choses égales par ailleurs les temps de trajet augmentent, il y a un désajustement avec le programme souhaité et l'individu arrive alors en retard à sa destination et subit un coût de déshorage. Il doit allouer du temps de transport supplémentaire et doit réajuster la dynamique de sa programmation, en rajustant principalement ses demandes d'activités non mandataires. Concernant l'activité de travail, et pour certains types de travailleurs, l'arrivée en retard peut être sanctionnée par un non paiement du salaire proportionnel à sa durée relativement à l'horaire qui doit être respecté. Nous pensons que ce coût d'arrivée en retard est strictement convexe avec la durée de retard, c'est-à-dire augmente de plus en plus rapidement avec le délai, car il y a chevauchement entre transport, activité intermédiaire, et travail, activité obligatoire pour laquelle l'individu est rémunéré et doit respecter un horaire de début qu'il dépasse. Pour un niveau \bar{t}_T caractérisant un temps de transport tel que l'individu arrive en retard, $\frac{\partial^2 \tilde{V}_S}{\partial \bar{t}_T^2} (R, T, \bar{c}_T, \bar{t}_T, w, p) \leq 0$. Le niveau d'utilité décroît plus que proportionnellement avec la durée du trajet. Dans ce contexte, nous avons $\pi'_{\bar{t}_T} (S, R, T, c_T, \bar{t}_T, w, p) \geq 0$. La propension à payer le temps de transport augmente avec la durée du trajet.

Parallèlement, le voyageur peut choisir un horaire de départ de son domicile lui assurant de toujours arriver en avance sur son lieu de travail : il évite ainsi le pic de congestion et réduit son temps et coût de trajet, mais il subit aussi un coût de déshorage puisqu'il arrive en avance et qu'il reste alors une partie de la ressource en

temps devant être allouée sur le lieu de travail, ou à proximité, à d'autres activités que cette dernière. Le fait d'arriver en avance reste coûteux : il s'agit d'un moment dans le cycle où l'individu doit s'adapter immédiatement pour pouvoir l'exploiter de façon profitable. Cette ressource temporaire est considérée comme une perte partielle de temps de loisirs. Vickrey(1969) souligne que le coût de déshorage lié à l'arrivée en avance reste moins élevé que le coût de déshorage lié à l'arrivée en retard, et la valeur du temps diminue à mesure que l'individu s'approche de son horaire de début de travail lorsqu'il arrive en avance. Pour un niveau \bar{t}_T caractérisant une durée de transport tel que l'individu arrive en avance, $\frac{\partial^2 \bar{V}_S}{\partial \bar{t}_T} (R, T, \bar{c}_T, \bar{t}_T, w, p) \geq 0$. Nous pouvons avoir $\pi'_{\bar{t}_T} (S, R, T, c_T, \bar{t}_T, w, p) \leq 0$: la propension à payer le temps de transport diminue avec la durée du déplacement.

Truong et Hensher (1985), Mohring, Schroeter et Wiboonchutikula(1987) montrent que le voyageur différencie sa propension à payer pour le temps de transport. Il décompose l'allocation totale en une somme d'allocations spécifiques à certaines dimensions de la réalisation du déplacement. Le temps n'est pas ressenti de la même façon lorsqu'il s'agit d'accéder, d'attendre un mode de transport ou de voyager à l'intérieur de celui-ci. Ces dimensions temporelles autorisent plus ou moins de facilité dans l'organisation d'activités exogènes complémentaires à l'activité de déplacement. Cette complémentarité par l'ajout d'activités profitables permet de diminuer la désutilité du transport. La valeur du temps à l'intérieur d'un mode de transport est plus élevée que la valeur du temps à l'extérieur de celui-ci. C'est un résultat facilement compréhensible, le voyageur pouvant dans le second cas avoir accès à un ensemble d'activités lui permettant d'exploiter en partie le temps alloué au transport à d'autres activités complémentaire lui permettant de satisfaire ses désirs et besoins. En accord avec l'intuition, plus il est facile d'endogénéiser ces dernières, moins la dimension du temps de trajet associée est ressentie comme pénible et plus la propension à payer pour son économie est importante.

Bruzelius(1979) souligne le fait qu'un automobiliste sous-estime le coût effectif lié à ses allocations temps et budget à l'utilisation de son véhicule. Ce biais de perception introduit un ensemble de problématiques concernant la distorsion faite par le voyageur concernant ses conditions effectives de transport. L'attachement à l'automobile et à la flexibilité apparente qu'elle autorise dans l'organisation d'un panier automobile efface partiellement le désagrément lié au déplacement, même en présence de congestion. Sa propension à payer pour l'épargne de temps est plus faible. La valorisation du temps de transport se différencie selon le mode de transport

que le voyageur utilise.

La valeur du temps est conditionnée par des attributs subjectifs constituant partiellement le contrat de transport. Sécurité, confort et aisance d'utilisation sont trois notions génériques, caractérisant un large spectre de causes non observables vraisemblablement significatives dans les décisions de transport d'un individu. Parmi les éléments déterminant la valorisation individuelle du temps se trouvent les aspects qualitatifs liés au déplacement : sécurité, confort, services aux passagers, convenance,.... La qualité ressentie par l'individu joue un rôle tel que plus un passager se voit porter une attention particulière durant le trajet, plus il se voit offrir confort et sécurité, plus la qualité perçue (différence entre celle qui est effectif et celle qui est désirée) est grande et influence favorablement le choix de ce contrat de transport. La nature coûteuse du déplacement est compensée par une offre de caractéristiques qualitatives permettant d'en compenser une partie. L'intuition suggère que la valeur du temps diminue avec le niveau de qualité perçue : le temps alloué semble moins désutile. Le confort physique se caractérise par l'ensemble des attributs contribuant à assurer un effort physique minimum durant le déplacement : être assis ou debout, confort de l'assise, présence d'espace de détente dans les stations et gares, etc.... L'influence de ces variables porte sur la perception du temps de transport. Un plus grand niveau de confort permet de tolérer plus facilement l'allocation temporelle au déplacement : la valeur du temps diminue avec le niveau de confort. La sécurité d'un mode de transport est étroitement liée à sa technologie, à la structure et l'entretien du réseau qu'il exploite, au degré de congestion ayant cours. L'aisance d'utilisation souligne à la fois la facilité d'accéder à un mode particulier, la facilité qu'il offre dans l'enchaînement des activités précédant et suivant celle pour laquelle il est utilisé, et l'aspect inertiel des habitudes de l'individu. En accord avec les travaux de Ben-Akiva, McFadden et al.(1999), Walker et Ben-Akiva(2002) sur l'endogénéisation des caractéristiques qualitatives d'un contrat de transport, nous soulignons l'importance de ces attributs composant les paniers de transport consommables dans la mesure où l'utilité de la mobilité ressentie par l'individu dépend de sa possibilité à pouvoir endogénéiser certaines de ces caractéristiques qualitatives désirables au cours du déplacements.

Conclusion.

Il semble que la pratique des systèmes de prévision des flux de transport ait obscurci la réelle nature de la valeur économique du temps, dont la conception reste propre à chaque individu. Nous avons vu qu'elle peut prendre plusieurs formes, et qu'elle est sensible à de nombreuses caractéristiques. Le lien existant entre transport et développement urbain, forme physique de la croissance économique circonscrite à un zone géographique, est fort, et la dynamique des interrelations au cours du temps impose de devoir constamment adapter les réseaux de circulation afin de pouvoir conserver l'attractivité de la zone. Ce dernier concept est à la source de son expansion économique, car il conditionne le développement et la localisation de zones résidentielles, industrielles et commerciales., donc l'évolution des conditions démographiques, sociales et économiques de la population attirée. En contrepartie, leurs impacts sur l'exploitation des réseaux de circulation, créant congestion et pollution, légitiment le fait que l'ensemble des usagers de tous types doivent contribuer à leur entretien et développement. Le choix d'une gamme de valeurs du temps pour la mise en application des systèmes de prévision est alors politique : une surévaluation de la propension à payer pour l'amélioration des conditions de transport peut conduire à imposer un projet d'aménagement inadapté à la population exploitant les infrastructures de transports, dégradant ainsi leurs niveaux de bien-être : seule la population ayant le pouvoir d'achat du temps nécessaire en ressortiront satisfait. D'un autre côté, une sous-évaluation des propensions à payer peut conduire à une répartition du financement du projet non favorable aux firmes présentes dans la région où l'investissement a lieu. Elles peuvent alors supporter des taxes locales compensant les gains termes de coûts de transport, et la croissance au niveau local est freinée.

La ponctualité, la régularité, la fiabilité d'une offre de transport, sont des causes dont l'intérêt ne cesse de grandir à mesure que le niveau de congestion augmente et se répand sur les réseaux de transports en milieu urbain. Les phénomènes de grèves, les règles procédurales d'exploitation sont des causes certaines de l'appréciation de l'aisance que procure un mode de transport dans la mobilité qu'il permet. Un réseau où les dysfonctionnements sont fréquents implique une valorisation du risque de perte en temps plus grande : la propension à payer pour voir son temps de transport diminuer avec certitude augmente, d'autant plus que la réactivité de l'opérateur du réseau est faible. Une marge de manoeuvre étroite dans la résolution des désajuste-

ments de l'offre effective diminue la vitesse de convergence de celle-ci vers son état théorique. La diffusion et l'absorption de ces chocs exogènes sur l'horloge du temps et dans l'espace conditionne la fiabilité et la régularité de l'offre. Dans un cadre où perfectibilité environnementale prévaut, il n'est pas possible de mesurer explicitement l'influence du risque de pertes de ressources temporelles et budgétaires dans les choix du voyageur. Cette limite associée à la définition de la valeur du temps, que nous pensons trop restrictive, nécessite une extension de notre approche initiale. Il découle de ces propos l'importance grandissante des systèmes d'informations aux passagers.

Chapitre 3

Modèles économétriques pour l'analyse du choix du mode de transport.

Introduction.

La gamme des modèles économétriques de choix discrets est devenue très large et diversifiée depuis les travaux initiaux de Thurstone(1927), Luce(1959), Marshack(1960), Block et Marshack(1960), et McFadden(1973, 1978). L'ouvrage de Train(2003) est exhaustif à ce sujet, couvrant les approches des modèles binaires Logit et Probit jusqu'aux développement récents des modèles de choix associés à la famille des lois extrêmes généralisées. Les travaux de Bierlaire(1998), Ben-Akiva et Bierlaire(1999) Small(1992), ont permis d'étendre l'interprétation de ces modèles. L'ouvrage de Ben-Akiva et Lerman(1985) focalise sur l'usage d'une partie de ces modèles dans le cadre de la modélisation de la demande de transport dans son ensemble. D'autres approches généralisent le cadre probabiliste de la maximisation de l'utilité, telles celles proposées par Walker(2000), Bolduc(2003), Ben-Akiva(2000), endogénéisant les réponses qualitatives explicatives d'un choix de transport.

Nous exposons la démarche statistique et les modèles empiriques que nous développons pour notre application au choix du mode de transport. Nous ne discutons pas des modèles emboîtés, l'intérêt de notre présentation étant l'explication et l'in-

interprétation des modèles statistiques que nous utilisons pour notre application. Le modèle d'échantillonnage est développé et sa définition relative à un comportement sous-jacent de maximisation de l'utilité des individus échantillonnés est présentée. Nous discutons ensuite des formes paramétriques envisageables, de l'interprétation des fonctionnelles mathématiques auxquelles elles font appel, et des propriétés générales d'un modèle de choix discret. Des contraintes identifiantes sont proposées, en accord aussi bien avec la pratique que l'interprétation théorique des paramètres du modèle. En choisissant des distributions de probabilité adéquates, des familles de modèles peuvent être définies. Nous présentons ici le modèle Logit multinomial non emboîté et ses extensions, et le modèle Probit non ordonné et ses extensions. Les particularités de chacun sont détaillées : formes analytiques des probabilités, problèmes spécifiques sur l'identification des paramètres, interprétations et limites des résultats.

3.1 Le cadre.

3.1.1 L'univers probabilisé.

La population \mathcal{P} étudiée est celle des travailleurs nécessitant un déplacement pour se rendre sur leurs lieux de travail. Le caractère statistique associé est le choix du mode de transport. L'univers des événements élémentaires est l'ensemble Ω discret et fini de tous les modes de transport parmi lesquels l'individu peut choisir. Un événement élémentaire $m \in \Omega$, $m = 1, \dots, \#(\Omega)$ où $\#(\Omega) = M$ est le cardinal de l'ensemble de choix, est un mode de transport utilisé. L'échantillon de taille N de voyageurs $n \in \mathcal{P}$, est tiré au hasard dans la population. Nous supposons que les individus sont indépendamment et identiquement distribués.

La variable "mode de transport utilisé" dont toutes les valeurs possibles sont connues, valeurs telles que nous sommes en mesure d'attacher à chacune une probabilité de réalisation connue, est aléatoire. Dans notre contexte, elle est représentée par une variable aléatoire Y discrète multinomiale. A chaque événement élémentaire est associé une valeur arbitraire le désignant. Sans perte de généralité, si Y prend la valeur m , $m = 1, \dots, M$, alors nous disons que l'individu choisit le m -ième mode de transport dans la liste préordonnée de l'ensemble de ceux-ci que nous établissons au préalable. Sur l'univers $(\Omega, \mathcal{B}_\Omega)$, où \mathcal{B}_Ω est une σ -algèbre d'événements, nous

définissons \mathbf{P}_Ω une mesure de probabilité régulière¹.

$$\forall m = 1, \dots, M, \mathbf{P}_\Omega(Y = m) \quad (3.1)$$

est la probabilité de tirer un individu qui choisit le mode m lorsque l'ensemble de choix est Ω .

3.1.2 Utilité et probabilité de choix.

Nous souhaitons établir une relation d'équivalence entre la probabilité de tirer un individu qui choisit le mode m et la probabilité de tirer dans la population un individu qui maximise son niveau d'utilité en choisissant le mode m . Nous désirons associer à chaque individu de la population \mathcal{P} étudiée un comportement économique rationnel. Nous supposons que chaque individu raisonne dans le cadre de la théorie classique de l'utilité. Son comportement satisfait à tous les axiomes sous-jacents, et prend corps dans un environnement parfait. L'information dont il dispose pour prendre sa décision, relativement à ses propres caractéristiques qu'il connaît parfaitement, est certaine et complète².

En tant que simple observateur, il nous manque une partie de cette information : nous concevons l'utilité U du consommateur comme une variable aléatoire continue. Cet argument est à la source de la dénomination "modèles à utilité aléatoire" proposée par Marshack(1960). Nous nous plaçons dans un espace probabilisé des utilités $(\mathbf{U}, \mathcal{B}_\mathbf{U}, \mathbf{P}_\mathbf{U})$: \mathbf{U} est l'univers continu des réalisations élémentaires des vecteurs de niveaux d'utilité. $u \in \mathbf{U}$ est un événement élémentaire caractérisant le bien-être que fournissent les modes de transport pour l'individu. $\mathcal{B}_\mathbf{U}$ est une σ -algèbre d'événements, mesurable. Nous notons $\mathbf{P}_\mathbf{U}$ la mesure régulière de probabilité associée à l'espace $(\mathbf{U}, \mathcal{B}_\mathbf{U})$.

Notons $u = (u_1, \dots, u_M)$, et considérons le système d'événements défini $\forall m = 1, \dots, M$, par

$$\mathcal{A}_m = (u \in \mathbf{U} | u_m = \max(u_1, \dots, u_M)), \quad (3.2)$$

les ensembles des réalisations élémentaires de la variable aléatoire u telles que le

¹Nous renvoyons le lecteur à l'ouvrage de Montfort(19??) pour une définition rigoureuse de cette mesure de probabilité.

²En réalité, l'environnement dans lequel il prend ses décisions est au mieux risqué. Nous étudions dans un chapitre ultérieur le comportement de choix de l'individu dans ce contexte.

mode m soit celui qui assure le niveau maximal de l'utilité pour ces réalisations.

Axiom 5 *La probabilité de tirer un individu qui choisit le mode m est égale à la probabilité de tirer un individu pour lequel m assure le niveau maximal d'utilité. Nous supposons que $\forall m = 1, \dots, M, \forall \mathcal{A}_m \in \mathcal{B}_{\mathbf{U}}$,*

$$\mathbf{P}_{\Omega}(Y = m) = \mathbf{P}_{\mathbf{U}}(\mathcal{A}_m). \quad (3.3)$$

Cette axiome circonscrit les comportements de tous les individus de la population à celui de la maximisation des préférences. Ainsi que l'ont souligné par McFadden(2003), Walker(2002), Ben-Akiva et al(2002), Bolduc(2003, 2004) il ne s'agit pas de l'unique règle de décision à envisager pour la définition d'un modèle probabiliste de choix discrets. Les récents développements intègrent des règles de décision dont la portée n'est pas limitée à l'application au champ économique, et qui donnent naissance à des modèles hybrides de choix mutuellement exclusifs. En pratique, il s'agit d'endogénéiser des facteurs décisionnels psychologiques qui laissent à penser que l'individu ne choisit pas nécessairement ce qu'il y a de plus efficace. Nous ne nous intéresserons pas à ces familles de modèles dans cette thèse.

D'autre part, l'égalité définie ci-dessus n'est pas sans conséquences particulières pour notre modèle. Ainsi que l'ont souligné Debreu(1958), Luce(1958), Block et Marshack(1960), McFadden et Richter(1971, 1991), Manski(1977), Falmagne(1978), Fishburn(1998), McFadden(2003), le système des \mathcal{A}_m , $m = 1, \dots, M$, ne forment pas nécessairement une partition³ de \mathbf{U} . Il existe $u \in \mathbf{U}$ qui peut appartenir à différents \mathcal{A}_m . Il peut exister des préordres de préférence qui conduisent à formuler des niveaux d'utilité tels que plusieurs modes soient ceux qui en assurent le maximum. Les réalisations élémentaires exhibant des situations de préférences où plusieurs modes de transport maximisent l'utilité appartiennent en même temps à plusieurs événements \mathcal{A}_m de $\mathcal{B}_{\mathbf{U}}$. U étant une variable aléatoire continue, $\mathbf{P}_{\mathbf{U}}$ est une mesure de probabilité continue. La probabilité que U prenne une valeur correspondant à une situation de préférence où l'argument maximisant le niveau d'utilité n'est pas unique est presque sûrement égale à 0. La probabilité de tirer un individu qui maximise son niveau

³Nous rappelons qu'une partition est un ensemble de parties disjointes de $\mathcal{B}_{\mathbf{U}}$ dont la réunion est \mathbf{U} tout entier.

d'utilité en choisissant le mode m est définie par

$$\forall m = 1, \dots, M, \mathbf{P}_\Omega(Y = m) = \mathbf{P}_\mathbf{U}(u \in \mathbf{U} | u_m \geq u_j, \forall j \neq m), \quad (3.4)$$

et la somme de ces probabilités est presque sûrement égale à 1,

$$\sum_{m=1}^M \mathbf{P}_\mathbf{U}(u \in \mathbf{U} | u_m \geq u_j, \forall j \neq m) \stackrel{ps}{=} 1. \quad (3.5)$$

L'axiome de continuité des préférences de la théorie du consommateur, énoncé par Debreu(1954), nous permet de supposer une mesure de probabilité continue sur l'espace des niveaux d'utilités. Cette hypothèse de continuité nous permet de supposer que l'argument maximisant le niveau d'utilité est presque sûrement unique, ce qui implique que la règle de choix sur Ω est presque sûrement décisive. Dans ce cas, la probabilité de tirer un individu qui choisit deux possibilités m et m' est nulle, et $\sum_{m=1}^M \mathbf{P}_\Omega(Y = m) = 1$. La mesure \mathbf{P}_Ω résultant de $\mathbf{P}_\mathbf{U}$ est presque sûrement unique. L'unicité du comportement de maximisation de l'utilité est presque sûre sans contrainte supplémentaire sur l'axiomatique classique proposée par Debreu(1954) définissant la fonction d'utilité.

Le cadre exposé ci-dessus reste trop général pour être directement opérationnel. Nous disposons d'informations statistiques permettant d'expliquer le processus de formation des niveaux d'utilité, c'est-à-dire un ensemble de variables explicatives du comportement de choix de l'individu. Paramétrer le modèle en définissant la fonctionnelle représentant l'utilité et ses composantes est une étape cruciale, dans laquelle doivent transparaître les arguments théoriques et méthodologiques du modélisateur. Le modèle conditionnel que nous définissons doit intégrer tous les facteurs décisionnels que nous considérons et leurs influences sur le processus de choix.

3.2 Modèles statistiques paramétriques.

3.2.1 Définition.

L'utilité u résulte d'une valorisation propre à l'individu $n \in \mathcal{P}$ du contenu de sa consommation de biens et services X_n relativement à ses souhaits et désirs déterminés par ses caractéristiques S_n . Un modèle d'échantillonnage paramétrique,

conditionnel au second ordre, peut permettre d'expliquer la formation des niveaux d'utilité, variable endogène aléatoire. Nous supposons une décomposition additive, telle que $\forall n \in \mathcal{P}, \forall m = 1, \dots, M$,

$$u_m(X_n, S_n; \theta) = V_m(X_n, S_n; \theta) + \varepsilon_m(X_n, S_n; \theta), \theta \in \Theta \subseteq \mathbb{R}^Q, \quad (3.6)$$

avec

$$V_m(X_n, S_n; \theta) = \mathbf{E}(u_m | X_n, S_n; \theta), \quad (3.7)$$

en notant $\mathbf{E}(\cdot | \cdot)$ l'espérance conditionnelle de l'utilité et où V_m est un niveau d'utilité observable, ou utilité stricte en reprenant la terminologie de Luce(1959), Marshack(1960), Block et Marshack(1960). ε_m est la partie aléatoire de l'utilité, celle que le modélisateur ne peut observer. $\theta \in \Theta \subseteq \mathbb{R}^Q$ est un vecteur de paramètres. X_n représente l'ensemble des caractéristiques des offres auxquelles fait face l'individu n . S_n représente ses caractéristiques personnelles observables. La partie inobservable de l'utilité dépend en toute généralité de ces caractéristiques, et de paramètres caractérisant la distribution des préférences au travers de la population pour les différentes possibilités de choix. En empilant les termes aléatoires, nous définissons le vecteur colonne

$$\varepsilon(X_n, S_n; \theta) = \varepsilon_n = (\varepsilon_1(X_n, S_n; \theta), \dots, \varepsilon_M(X_n, S_n; \theta))', \quad (3.8)$$

où $(a)'$ est la transposée d'un vecteur a , et nous supposons $\forall n \in \mathcal{P}$,

$$\varepsilon(X_n, S_n; \theta) \stackrel{iid}{\rightarrow} F(\varepsilon | X_n, S_n; \theta). \quad (3.9)$$

La loi multivariée F , fonction de répartition des perturbations conditionnelle aux variables explicatives X_n, S_n et au paramètre θ est indépendamment et identiquement distribuée (*iid*) au travers de la population \mathcal{P} d'individus. Nous notons f la densité correspondante. Connaissant θ , elle est entièrement déterminée. Nous admettons que ce dernier porte sur les deux premiers moments de la distribution, suffisant à décrire totalement le comportement du vecteur aléatoire $u(X_n, S_n; \theta) = u_n = (u_1(X_n, S_n; \theta), \dots, u_M(X_n, S_n; \theta))'$. Son espérance conditionnelle est définie en reprenant l'équation (3.7) et en empilant les M niveaux d'utilité stricte $V(X_n, S_n; \theta) = V_n = (V_1(X_n, S_n; \theta), \dots, V_M(X_n, S_n; \theta))'$:

$$V(X_n, S_n; \theta) = \mathbf{E}(u_n | X_n, S_n; \theta). \quad (3.10)$$

Nous notons

$$\mathbf{Var}(u_n|X_n, S_n; \theta) = \mathbf{Var}(\varepsilon_n|X_n, S_n; \theta) = \Sigma(X_n, S_n; \theta) \quad (3.11)$$

la matrice de variance-covariance conditionnelle de l'utilité.

La variable aléatoire observable Y peut être redéfinie comme un vecteur de dimension M de variables aléatoires dichotomiques, telles que

$$\forall n \in \mathcal{P}, \forall m = 1, \dots, M, Y_{nm} = \begin{cases} 1 & \text{si } u_{nm} = \max_{j \in \Omega} (u_{nj}) \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}. \quad (3.12)$$

La fonction ℓ qui à $\theta \in \Theta \subseteq \mathbb{R}^Q$ fait correspondre pour un couple $(y_n; X_n, S_n)$ observé,

$$\ell(y_n|X_n, S_n; \theta) = \prod_{m=1}^M [\mathbf{P}_\Omega(y_{nm} = 1|X_n, S_n; \theta)]^{y_{nm}}, \quad (3.13)$$

est la contribution à la vraisemblance de l'individu $n \in \mathcal{P}$, avec

$$\begin{aligned} \mathbf{P}_\Omega(y_{nm}|X_n, S_n; \theta) &= \\ \mathbf{P}_\mathbf{U}(u_{nm} \geq u_{nm'}, \forall m' \neq m|X_n, S_n; \theta) &= \\ \mathbf{P}_\mathbf{U}(\varepsilon_{nm'} - \varepsilon_{nm} \leq V_{nm} - V_{nm'}, \forall m' \neq m|X_n, S_n; \theta). \end{aligned} \quad (3.14)$$

En définissant $\forall m = 1, \dots, M$, \mathbf{A}_m l'application linéaire de \mathbb{R}^M dans \mathbb{R}^{M-1} , matrice à $M - 1$ lignes et M colonnes, telle que

$$\mathbf{A}_m = \begin{bmatrix} 1 & \cdots & -1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & \cdots & -1 & 1 & \cdots & 0 \\ \vdots & & \vdots & & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & -1 & 0 & \cdots & 1 \end{bmatrix}, \quad (3.15)$$

↑
m-ième colonne

nous pouvons simplifier $\forall m = 1, \dots, M$ l'écriture de la probabilité de choix. Posons comme notation \ll telle que pour deux vecteurs u_1, u_2 , $u_1 \ll u_2 \Leftrightarrow u_{1,m} \leq u_{2,m}$,

$m = 1, \dots, M$.

$$\mathbf{P}_U(\mathbf{A}_m \varepsilon(X_n, S_n; \theta) \ll -\mathbf{A}_m V(X_n, S_n; \theta) | X_n, S_n; \theta). \quad (3.16)$$

Les probabilités de choix sont définies comme des rectangles de probabilité sur \mathbb{R}^{M-1} . En exploitant la définition de la loi conditionnelle des perturbations, la vraisemblance conditionnelle de l'individu s'écrit dans ce contexte général

$$\begin{aligned} \ell(y_n | X_n, S_n; \theta) = & \\ \prod_{m=1}^M \left(\iint_{\mathbb{R}^{M-1}} \mathbb{I}(\mathbf{A}_m \varepsilon(X_n, S_n; \theta) \ll -\mathbf{A}_m V(X_n, S_n; \theta)) f(\varepsilon_n | X_n, S_n; \theta) d\varepsilon_n \right)^{y_{nm}} & \\ \prod_{m=1}^M \left(\iint_{\mathbb{R}^{M-1}} \mathbb{I}(\mathbf{A}_m \varepsilon(X_n, S_n; \theta) \ll -\mathbf{A}_m V(X_n, S_n; \theta)) dF(\varepsilon_n | X_n, S_n; \theta) \right)^{y_{nm}} & \end{aligned} \quad (3.17)$$

où $\iint_{\mathbb{R}^{M-1}}$ est une intégrale multiple de dimension $M - 1$. $\mathbb{I}(a)$ est la fonction indicatrice de l'événement a : $\mathbb{I}(a)$ vaut 1 si a est satisfait, 0 sinon. De nombreuses précisions doivent être portées sur la loi F (ou f) et la forme de V pour obtenir un modèle qui soit opérationnel.

3.2.2 Le processus générateur des données.

L'utilité de l'individu n lorsqu'il choisit le mode m s'écrit comme une combinaison linéaire de fonctions des variables explicatives, c'est-à-dire des attributs propres à la modalité m , X_n , et des attributs propres à l'individu n , S_n . $\forall n \in \mathcal{P}, \forall m = 1, \dots, M$. Nous distinguons pour les variables propres aux alternatives deux types distincts : les variables continues à support strictement positif, notées $X_{1,n}$ et les autres, notées $X_{2,n}$. Les variables aléatoires X_1 , continues et à support strictement positif, font chacune intervenir un paramètre λ . La transformation

$$\forall x > 0, y = \begin{cases} \frac{x^\lambda - 1}{\lambda} & \text{si } \lambda \neq 0 \\ \ln(x) & \text{si } \lambda = 0 \end{cases} \quad (3.18)$$

est appelée transformation de Box et Cox(1964), cas particulier de la transformation de Tukey(1957). Elle représente le degré de déformation de la mesure naturelle de la variable à laquelle il est associée. Pour exemple, la perception du temps de trajet peut amplifier (ou diminuer) la mesure réelle de ce temps. L'introduction de cette

transformation dans la spécification de l'espérance conditionnelle d'utilité est due à Gaudry(1978, 1981). Elle apporte plus de flexibilité dans l'interprétation de la forme de la fonction d'utilité. Prédéterminer les valeurs de ces transformation est équivalent à prédéterminer partiellement la forme de la fonction d'utilité. Deux cas particuliers sont souvent utilisés en pratique : $\lambda = 0$, admettant le logarithme de la variable pour transformation, et $\lambda = 1$, laissant la variable inchangée (forme linéaire).

La forme générale du processus générateur des données est la suivante :

$$u_{n,m} = \sum_{i=1}^{P_1} \theta_{1,i} \frac{X_{1,n,m,i}^{\lambda_i} - 1}{\lambda_i} + \sum_{j=1}^{P_2} \theta_{2,j} X_{2,n,m,j} + \sum_{k=1}^{P_3} \beta_{m,k} S_{n,k} + \varepsilon_{n,m}. \quad (3.19)$$

Les paramètres θ_1 , θ_2 , β de la combinaison linéaire définissant la fonction d'utilité sont les poids associés aux variables et représentent l'importance accordée par l'individu à celles-ci dans le processus de valorisation des niveaux d'utilité. Nous distinguons les variables propres aux alternatives, X_1 et X_2 , dont les pondérations restent les mêmes (θ_1 et θ_2 ne dépendent pas de m), et les variables S_n , incluant la constante, dont les pondérations sont propres à l'alternative m . Les attributs des offres ont la même importance pour le décideur quels que soient leurs niveaux, mais l'impact de ses propres caractéristiques est différencié selon l'alternative qu'il évalue. ε est la part inobservable de l'utilité. Elle cumule tous les facteurs non quantifiables. Nous supposons qu'elle est de moyenne nulle, et de matrice de variance-covariance

$$\Sigma_\varepsilon = \begin{bmatrix} \sigma_1^2 & \cdots & \sigma_{1M} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \sigma_{M1} & \cdots & \sigma_M^2 \end{bmatrix}. \quad (3.20)$$

L'écriture de la matrice de variance-covariance est simplifiée. Ses composantes peuvent dépendre explicitement des variables explicatives. Nous détaillerons cette possibilité plus avant. Nous focalisons dans un premier temps sur les implications de cette spécification économétrique générale dans le problème d'identification des paramètres estimables du modèle.

3.2.3 Propriétés des probabilités de choix : stratégies d'identification.

Sous sa forme générale, le modèle n'est pas identifié. Il existe pour les paramètres du premier ordre et pour ceux du second ordre une infinité de valeurs possibles conduisant à une même valeur de la vraisemblance individuelle conditionnelle. Sans contraintes d'exclusion supplémentaires, il existe une infinité de distributions conditionnelles pour le vecteur des perturbations conduisant aux mêmes valeurs des probabilités de choix. L'expression de nos probabilités de choix est définie à partir des différences entre les niveaux d'utilités. Nous devons rester prudents sur les implications d'un tel résultat sur l'identification des paramètres du modèle pour la forme de V que nous utilisons. Selon la nature des variables explicatives auxquelles ils sont associés, ils ne revêtent pas la même interprétation. La différence entre deux niveaux d'utilité, à la source de l'expression des probabilités de choix, s'écrit $\forall n \in \mathcal{P}$, $\forall m, m' = 1, \dots, M$, $m' \neq m$,

$$u_{nm} - u_{nm'} = \sum_{i=1}^{P_1} \theta_{1,i} \left(\frac{X_{1,nmi}^{\lambda_i} - 1}{\lambda_i} - \frac{X_{1,nm'i}^{\lambda_i} - 1}{\lambda_i} \right) + \sum_{j=1}^{P_2} \theta_{2,j} (X_{2,nmj} - X_{2,nm'j}) + \sum_{k=1}^{P_3} (\beta_{mk} - \beta_{m'k}) S_{nk} + (\varepsilon_{nm} - \varepsilon_{nm'}). \quad (3.21)$$

$\forall n \in \mathcal{P}$, $\forall m = 1, \dots, M$, l'expression $-\mathbf{A}_m V(X_n, S_n; \theta)$, point du support auquel la fonction de répartition du vecteur aléatoire $\mathbf{A}_m \varepsilon(X_n, S_n; \theta)$ est évaluée, pose un problème d'identification pour les paramètres associés aux variables explicatives propres à l'individu, y compris les constantes du modèles. Seules les différences entre ces paramètres interviennent dans la détermination de la probabilité de choix. Le poids de la variable dans la modalité m pour laquelle la probabilité de choix est évaluée est mesuré relativement aux poids de cette variable dans les autres possibilités de choix. C'est un résultat vérifié pour toutes les probabilités de choix. Il n'est pas possible d'estimer isolément chacun de ces paramètres. Une stratégie d'identification consiste à fixer pour chaque variable S_k , $k = 1, \dots, P_3$, une ou plusieurs modalités de référence à partir de laquelle nous mesurons l'écart induit par les différences d'importance de cette variable relativement aux autres possibilités de choix :

$$\forall k = 1, \dots, P_3, \exists m^*(k) \in \Omega, \beta_{m^*(k)k} = 0. \quad (3.22)$$

En supposant qu'il existe pour chaque variable propre à l'individu au moins une modalité de référence pour laquelle le paramètre associé a une valeur nulle, nous pouvons estimer les autres paramètres associés à cette variable. Leur interprétation est changée : ils représentent les écarts d'importance relativement aux modalités de référence. Nous remarquons que les paramètres associés aux variables propres à chaque modalité sont tous identifiables.

La définition des probabilités de choix pose problème sur l'identification des paramètres du second ordre, et induit une nouvelle problématique sur l'identification des paramètres de l'espérance conditionnelle de l'utilité. Les vecteurs aléatoires définis $\forall n \in \mathcal{P}, \forall m = 1, \dots, M$ par $\mathbf{A}_m \varepsilon_n$ sont des transformées linéaires du vecteur initial des perturbations ε_n . Il résultent de la redéfinition du vecteur aléatoire d'utilité un vecteur aléatoire de différences d'utilité. Par construction, ils sont de moyennes nulles, et leurs matrices de variance-covariance sont définies $\forall n \in \mathcal{P}, \forall m = 1, \dots, M$ par

$$\mathbf{V}(\mathbf{A}_m \varepsilon_n | X_n, S_n; \theta) = \Xi_m = \mathbf{A}_m \Sigma_\varepsilon \mathbf{A}'_m = \mathbf{A}_m \begin{bmatrix} \sigma_1^2 & \cdots & \sigma_{1M} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \sigma_{M1} & \cdots & \sigma_M^2 \end{bmatrix} \mathbf{A}'_m. \quad (3.23)$$

Précisément, les éléments des diagonales de ces matrices sont

$$\forall m \in \Omega, \forall j \in \Omega \setminus \{m\}, \omega_{m,j}^2 = \omega_{m,jj} = \sigma_m^2 + \sigma_j^2 - 2\sigma_{mj}, \quad (3.24)$$

et les éléments hors diagonales sont

$$\forall m \in \Omega, \forall j, k \in \Omega \setminus \{m\}, j \neq k, \omega_{m,jk} = \sigma_m^2 + \sigma_{jk} - \sigma_{mj} - \sigma_{mk}. \quad (3.25)$$

Chaque Ξ_m définit un système de $\frac{(M-1)M}{2}$ équations à $\frac{M(M+1)}{2}$ inconnues. M degrés de libertés subsistent : il existe plusieurs valeurs de la matrice de variance-covariance des perturbations du modèle qui conduisent aux mêmes valeurs des matrices de variance-covariance des vecteurs transformés. Il faut imposer au moins M contraintes identifiantes pour que les relations entre Σ_ε et les transformations Ξ_m soient bijectives. Nous pouvons normaliser la matrice de variance-covariance à sa matrice de corrélation correspondante en imposant une variance unitaire pour les M modalités. Lorsque nous souhaitons contraindre uniquement les éléments hors

diagonale, ces hypothèses portent sur au moins deux modalités. En général, ils sont tous contraints à être nuls, caractérisant une situation où les perturbations sont hétéroscédastiques. Le nombre de contraintes identifiantes est alors strictement supérieur à M .

Nous rappelons le caractère ordinal de la fonction d'utilité, définie à une transformation affine monotone croissante près. Normaliser la fonction d'utilité par un scalaire ne modifie pas le préordre de préférences qu'elle représente. Dans notre contexte, normaliser un vecteur aléatoire d'utilité à une matrice de variance covariance identité ne modifie pas le préordre de préférence qu'il représente. Supposons

$$\forall n \in \mathcal{P}, \forall m = 1, \dots, M, \Xi_m = \mathbf{L}_m \mathbf{L}_m', \quad (3.26)$$

la décomposition de Cholesky de la matrice de variance-covariance du m -ième vecteur transformé des perturbations. Ce sont des matrices triangulaires inférieures de dimension $M - 1$, dont nous notons l'expression

$$\forall n \in \mathcal{P}, \forall m = 1, \dots, M, \mathbf{L}_m = \begin{bmatrix} l_{11,m} & \cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ l_{M-1,1,m} & \cdots & l_{M-1,M-1,m} \end{bmatrix}, \quad (3.27)$$

et dont les éléments $l_{ij,m} \equiv l_{ij,m}(\theta)$, $i = 1, \dots, M - 1, j \leq i$, sont définis de façon unique⁴ relativement aux éléments de Σ_ε , en supposant les M contraintes identifiantes nécessaires établies. Redéfinies relativement à cette décomposition, les probabilités de choix peuvent s'écrire de façon équivalente à leur première définition

$$\mathbf{P}_U(\mathbf{L}_m \zeta_{nm} \ll -\mathbf{A}_m V(X_n, S_n; \theta) | X_n, S_n; \theta), \quad (3.28)$$

où ζ_{nm} est un vecteur aléatoire dont les $M - 1$ éléments sont deux à deux indépendants et de variance unitaire. En utilisant la règle de Bayes, nous pouvons réécrire ces probabilités comme le produit de loi marginales conditionnelles. Nous voyons apparaître de façon plus explicite l'influence de la matrice de variance-covariance

⁴Précisément, les éléments de la diagonale sont définis $\forall i = 1, \dots, M - 1$, $l_{ii,m} = \sqrt{\omega_{m,ii} - \sum_{k=1}^{i-1} l_{ik,m}^2}$ et les éléments hors diagonale $\forall i = 1, \dots, M - 1, \forall j < i$, $l_{ij,m} = \frac{(\omega_{m,ii} - \sum_{k=1}^{i-1} l_{ik,m} l_{jk,m})}{l_{ii,m}}$.

sur l'identification de tous les paramètres du modèle.

$$\begin{aligned}
& \mathbf{P}_{\mathbf{U}}(\mathbf{L}_m \zeta_{nm} \ll -\mathbf{A}_m V(X_n, S_n; \theta) | X_n, S_n; \theta) = \\
& \mathbf{P}_{\mathbf{U}}\left(\zeta_{nm,1} \ll -\frac{\mathbf{A}_{m,1} V(X_n, S_n; \theta)}{l_{11,m}} | X_n, S_n; \theta\right) * \\
& \prod_{i=2}^{M-1} \mathbf{P}_{\mathbf{U}}\left(\zeta_{nm,i} \ll -\frac{\mathbf{A}_{m,i} V(X_n, S_n; \theta) + \sum_{j=1}^i l_{ij,m} \zeta_{nm,j}}{l_{ii,m}} | Q_{m,<i-1}, X_n, S_n; \theta\right), \tag{3.29}
\end{aligned}$$

où

$$\begin{aligned}
& i = 2, \dots, M-1, Q_{m,<i} = \\
& \left\{ \zeta_{nm,1} < -\frac{\mathbf{A}_{m,1} V(X_n, S_n; \theta)}{l_{11,m}}, \dots, \zeta_{nm,i} < -\frac{\mathbf{A}_{m,i} V(X_n, S_n; \theta) + \sum_{j=1}^i l_{ij,m} \zeta_{nm,j}}{l_{ii,m}} \right\}. \tag{3.30}
\end{aligned}$$

Pour toutes les probabilités de choix, les paramètres des différences de niveaux des utilités strictes, i.e. les espérances conditionnelles, sont tous normalisés par les racines carrées des différents éléments de la diagonale de la décomposée de Cholesky associée.

Lorsque nous imposons seulement M contraintes identifiantes sur la matrice de variance-covariance des perturbations, le modèle n'est toujours pas identifié. Au moins une contrainte supplémentaire doit être établie. Dans le cas où Σ_ε est la matrice de corrélation, il suffit de supposer qu'une des modalités au moins est indépendante de la première option de choix. Dans la mesure où Ω est un ensemble non ordonné, il peut s'agir de n'importe quelle corrélation entre deux modalités. Il suffit de réordonner les options de choix de façon adéquate. Il existe au moins un élément $l_{11,m}$ qui est égal à une constante, permettant d'identifier les paramètres de l'espérance conditionnelle, qui à leur tour permettent d'identifier les autres paramètres de la matrice de variance-covariance. En présence d'hétéroscédaticité, le caractère ordinal de la fonction d'utilité joue un rôle. Nous devons choisir une modalité pour laquelle la variance est normalisée à l'unité.

Une condition nécessaire et suffisante d'identification des paramètres du second ordre d'un modèle probabiliste de choix est d'établir au moins $M + 1$ contraintes identifiantes sur la matrice de variance-covariance conditionnelle des perturbations. Le modèle est juste identifié s'il y a exactement $M + 1$ contraintes, suridentifié s'il y en a plus. La contrainte supplémentaire doit porter sur l'une des corrélations entre deux modalités lorsque les M contraintes normalisent les variances à l'unité. En pré-

sence d'hétéroscédasticité, il doit y avoir une contrainte normalisant au moins une variance à l'unité. Le choix du paramétrage d'une distribution F n'est pas innocent. Il permet surtout d'imposer des contraintes d'exclusion sur les paramètres du second ordre afin de pouvoir disposer d'un modèle dont les paramètres estimables ont une interprétation concrète. En toutes circonstances, les paramètres de l'espérance conditionnelle s'expriment relativement à un facteur d'échelle normalisant la matrice de variance-covariance. Selon les hypothèses qui seront portées sur sa forme paramétrique, la stratégie d'identification et l'interprétation des paramètres du modèle diffèrent sensiblement.

3.3 Le modèle Logit multinomial non emboîté et ses extensions.

La distribution jointe du vecteur des perturbations est le produit de lois extrêmes univariées de type 1, ou loi de Gumbel⁵ :

$$F(\varepsilon_n | X_n, S_n; \theta) = \exp\left(-\sum_{m=1}^M \exp\left(-\frac{\varepsilon_{nm}}{\sigma}\right)\right) = \prod_{m=1}^M \exp\left(-\exp\left(-\frac{\varepsilon_{nm}}{\sigma}\right)\right) = \prod_{m=1}^M F_m(\varepsilon_{nm}). \quad (3.31)$$

La loi conditionnelle des perturbations ne dépend pas des variables explicatives observables. Elle est définie par une loi marginale synthétisant tous les aspects inobservables des préférences de l'individu échantillonné. Cette distribution, limitée dans son interprétation, suggère le modélisateur apte à quantifier toutes les interrelations existantes entre les possibilités de choix. Elle suppose que les composantes inobservables ont même dispersion et sont indépendantes. La matrice de variance-covariance

⁵La loi de Gumbel, notée $\mathcal{G}(\mu, \sigma)$, admet pour fonction de répartition au point $a \in \mathbb{R}$, $F(a) = \exp\left(-\exp\left(-\left(\frac{a-\mu}{\sigma}\right)\right)\right)$. μ est un paramètre de localisation de la distribution sur son support, et σ est un paramètre de dispersion. Une variable aléatoire X distribuée selon une loi $\mathcal{G}(\mu, \sigma)$ a pour espérance $E(X) = \mu + \gamma\sigma$ et pour variance $V(X) = \frac{\sigma^2\pi^2}{6}$, γ est la constante d'Euler(1781).

conditionnelle du vecteur des niveaux d'utilité est dans ce cadre

$$\Sigma_\varepsilon = \sigma^2 \frac{\pi^2}{6} \begin{bmatrix} 1 & \cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & 1 \end{bmatrix} \quad (3.32)$$

McFadden(1973) justifie l'usage de cette hypothèse sur plusieurs aspects. Les probabilités de choix qu'elle permet d'obtenir admettent une forme analytique réduite, facilitant considérablement le travail empirique pour lequel elle est spécifiée. Plus intéressant, elle possède la propriété de max-stabilité : le maximum de M variables aléatoires *iid* selon une distribution extrême de type 1 est aussi une variable aléatoire de distribution extrême de type 1. Il⁶ étend ces deux propositions à toute une famille de lois de probabilités, les lois extrêmes généralisées.

La forme analytique des probabilités de choix est obtenue en appliquant la loi des perturbations à leur expression générale :

$$\begin{aligned} \forall m \in \Omega, \mathbf{P}_\Omega (y_{nm} = 1 | X_n, S_n; \theta) &= \int_{-\infty}^{+\infty} \left[\prod_{k \neq m} F_k \left(\frac{V_{nm} - V_{nk} + \varepsilon_{nm}}{\sigma} \right) \right] f_m(\varepsilon_{nm}) d\varepsilon_{nm} = \\ &= \int_{-\infty}^{+\infty} \left[\prod_{k \neq m} \exp \left(- \exp \left(- \left(\frac{V_{nm} - V_{nk} + \varepsilon_{nm}}{\sigma} \right) \right) \right) \right] d \left(\exp \left(- \exp \left(\frac{-\varepsilon_{nm}}{\sigma} \right) \right) \right) = \\ &= \int_{-\infty}^{+\infty} \left[\exp \left(- \sum_{k \neq m} \exp \left(- \left(\frac{V_{nm} - V_{nk} + \varepsilon_{nm}}{\sigma} \right) \right) \right) \right] d \left(\exp \left(- \exp \left(\frac{-\varepsilon_{nm}}{\sigma} \right) \right) \right) = \\ &= \int_{-\infty}^{+\infty} \left[\exp \left(- \exp \left(\frac{-\varepsilon_{nm}}{\sigma} \right) \right) \sum_{k \neq m} \exp \left(\frac{V_{nk} - V_{nm}}{\sigma} \right) \right] d \left(\exp \left(- \exp \left(\frac{-\varepsilon_{nm}}{\sigma} \right) \right) \right) = \\ &= \int_{-\infty}^{+\infty} \left[\exp \left(- \exp \left(\frac{-\varepsilon_{nm}}{\sigma} \right) \right) \right] \sum_{k \neq m} \exp \left(\frac{V_{nk} - V_{nm}}{\sigma} \right) d \left(\exp \left(- \exp \left(\frac{-\varepsilon_{nm}}{\sigma} \right) \right) \right). \end{aligned} \quad (3.33)$$

En effectuant un changement de variable, $y_{nm} = \exp \left(- \exp \left(\frac{-\varepsilon_{nm}}{\sigma} \right) \right)$, nous obtenons

$$\begin{aligned} \mathbf{P}_\Omega (y_{nm} = 1 | X_n, S_n; \theta) &= \int_0^1 y_{nm}^{\sum_{k \neq m} \exp \left(\frac{V_{nk} - V_{nm}}{\sigma} \right)} dy_{nm}, = \\ &= \left[\frac{y_m^{1 + \sum_{k \neq m} \exp \left(\frac{V_{nk} - V_{nm}}{\sigma} \right)}}{1 + \sum_{k \neq m} \exp \left(\frac{V_{nk} - V_{nm}}{\sigma} \right)} \right]_0^1 = \frac{1}{1 + \sum_{k \neq m} \exp \left(\frac{V_{nk} - V_{nm}}{\sigma} \right)} = \frac{\exp \left(\frac{V_{nm}}{\sigma} \right)}{\sum_{k=1}^M \exp \left(\frac{V_{nk}}{\sigma} \right)}. \end{aligned} \quad (3.34)$$

Les niveaux d'utilité stricte sont normalisé par le paramètre de dispersion σ , commun à toutes les distributions marginales des perturbations. Les paramètres $\theta_1, \theta_2, \beta_1, \dots, \beta_M$ pondérant les variables explicatives s'expriment relativement à ce ratio

⁶McFadden(1978)

dans les expressions des probabilité de choix. Ce sont les ratios $\frac{\theta_1}{\sigma}, \frac{\theta_2}{\sigma}, \frac{\beta_1}{\sigma}, \dots, \frac{\beta_M}{\sigma}$ qui sont identifiables. Les valeurs numériques de leurs estimations n'ont pas d'interprétation concrète. Leur signe et leur signification statistique sont les seules informations d'intérêt. Soulignons que le rapport de deux de ces paramètres, lorsqu'ils sont associés à deux variables explicatives quantitatives, caractérise le taux marginal de substitution entre ces deux quantités.

Les niveaux d'utilités u_{nm} sont des fonctions d'utilité indirectes lorsqu'elles sont définies dans le contexte classique de la maximisation de l'utilité sous contrainte budgétaire. Notons $R_n - p_{nm}$ le niveau de revenu net des frais de transport lié au choix m de l'individu n . Pour chaque modalité m , la fonction d'utilité indirecte dépend de cette variable. Supposons qu'elle soit parfaitement observable : elle n'intervient que dans l'expression des niveaux stricts V_{nm} . Supposons aussi que ces niveaux de revenus net n'interviennent que dans leurs propres modalités. Daly, Williams et Zacchari(1978) montrent qu'il est possible de déduire les probabilités de choix comme des fonctions de demandes Walrasiennes, lorsque la variable "revenu net des frais de transport" intervient comme variable explicative dans toute les possibilités de choix. En effet, l'utilité que retire l'individu de son choix est le niveau maximum qu'il peut atteindre avec les offres qui lui sont proposées :

$$W_n = \max(u_{n1}, \dots, u_{nM}). \quad (3.35)$$

La loi de cette variable aléatoire W_n est simple à déterminer :

$$\Pr(W_n < a) = \Pr(\max(u_{n1}, \dots, u_{nM}) < a) = \Pr(u_{n1} < a, \dots, u_{nM} < a). \quad (3.36)$$

En utilisant l'hypothèse d'indépendance,

$$\Pr(W_n < a) = \prod_{m=1}^M \Pr(u_{nm} < a) = \prod_{m=1}^M \Pr(\varepsilon_{nm} < a - V_{nm}). \quad (3.37)$$

Nous exploitons l'hypothèse d'identité et la distribution jointe pour déterminer

$$\Pr(W_n < a) = \prod_{m=1}^M \exp\left(-\exp\left(\frac{-a+V_{nm}}{\sigma}\right)\right) = \exp\left(-\exp\left(\frac{-a}{\sigma} + \ln\left(\sum_{m=1}^M \exp\left(\frac{V_{nm}}{\sigma}\right)\right)\right)\right), \quad (3.38)$$

où la dernière égalité est obtenue en utilisant les propriétés des fonctions exponentielle et logarithme. La fonction de répartition de W_n est celle d'une distribution extrême de type 1, ayant pour espérance $\sigma\gamma + \ln\left(\sum_{m=1}^M \exp\left(\frac{V_{nm}}{\sigma}\right)\right)$, γ étant la constante d'Euler. L'expression est connue sous le nom de "logsum" et caractérise à une constante près l'utilité maximale espérée pour le contenu de l'ensemble de choix proposé⁷. La variable aléatoire "utilité maximale" peut être écrite sous la forme

$$W_n = \ln\left(\sum_{m=1}^M \exp\left(\frac{V_{nm}}{\sigma}\right)\right) + \varsigma_n, \varsigma_n \xrightarrow{iid} F_{\varsigma_n}(a_n) = \exp\left(-\exp\left(\frac{-a_n}{\sigma}\right)\right). \quad (3.39)$$

L'identité de Roy nous permet d'affirmer que la demande pour une alternative $m \in \Omega$ est définie par

$$\begin{aligned} -\frac{\frac{\partial W_n}{\partial p_{nm}}}{\frac{\partial W_n}{\partial R_n}} &= -\frac{\frac{\partial V_{nm}}{\partial p_{nm}} \exp\left(\frac{V_{nm}}{\sigma}\right)}{\sum_{m=1}^M \frac{\partial V_{nm}}{\partial R_n} \exp\left(\frac{V_{nm}}{\sigma}\right)} = \\ \frac{\exp\left(\frac{V_{nm}}{\sigma}\right)}{\sum_{m=1}^M \exp\left(\frac{V_{nm}}{\sigma}\right)} &= \mathbf{P}_{\Omega}(y_{nm} = 1 | X_n, S_n; \theta), \end{aligned} \quad (3.40)$$

car d'après notre spécification de l'espérance conditionnelle de l'utilité, la variable revenu net a des niveaux différents, causés par les différences de coûts propres à chaque choix possible, mais un poids et une perception identique quel qu'il soit. Dans notre cadre, la monnaie est seulement un moyen d'échange.

Notre hypothèse d'indépendance et identité des perturbations distribuées selon une loi extrême de type 1, associée à l'hypothèse selon laquelle les variables propres à chaque alternative n'interviennent que dans leurs propres modalités, imposent au contexte d'application de respecter l'axiome d'indépendance à l'égard des alternatives non pertinentes (voir Luce(1959)). Debreu(1958) en synthétise les limites dans un exemple connu sous le nom de "bus bleu-bus rouge". Le degré de substitution entre deux modalités est indépendant de l'ensemble de choix dans lequel elles existent. Notons $\forall n \in \mathcal{P}$, \mathcal{M} un ensemble de choix tel que $\Omega \subset \mathcal{M}$. L'ensemble des variables observables propres aux nouvelles alternatives est noté \tilde{X}_n , l'ensemble des paramètres correspondant $\tilde{\theta}$ et le vecteur aléatoire endogène observé \tilde{y}_n . Nous

⁷Ben-Akiva et Lerman(1985) exposent de façon détaillée les propriétés et le rôle de cette expression dans la modélisation de systèmes de décisions emboîtées.

remarquons immédiatement $\forall n \in \mathcal{P}, \forall m, m' \in \Omega \subset \mathcal{M}, m' \neq m$,

$$\frac{\mathbf{P}_{\Omega}(y_{nm}=1|X_n, S_n; \theta)}{\mathbf{P}_{\Omega}(y_{nm'}=1|X_n, S_n; \theta)} = \frac{\mathbf{P}_{\mathcal{M}}(\tilde{y}_{nm}=1|\tilde{X}_n, S_n; \tilde{\theta})}{\mathbf{P}_{\mathcal{M}}(\tilde{y}_{nm'}=1|\tilde{X}_n, S_n; \tilde{\theta})} = \frac{\exp\left(\frac{\sum_{i=1}^{P_1} \theta_{1,i} \frac{X_{1, nmi}^{\lambda_i} - 1}{\lambda_i} + \sum_{i=1}^{P_2} \theta_{2,j} X_{2, nmj} + \sum_{k=1}^{P_3} \beta_{mk} S_{nk}}{\sigma}\right)}{\exp\left(\frac{\sum_{i=1}^{P_1} \theta_{1,i} \frac{X_{1, nm'i}^{\lambda_i} - 1}{\lambda_i} + \sum_{i=1}^{P_2} \theta_{2,j} X_{2, nm'j} + \sum_{k=1}^{P_3} \beta_{m'k} S_{nk}}{\sigma}\right)}. \quad (3.41)$$

Toutes les probabilités de choix des possibilités déjà existantes ont même taux de variation suite à l'introduction de nouvelles options de choix. $\forall n \in \mathcal{P}, \forall m, m' \in \Omega \subset \mathcal{M}, m' \neq m$,

$$\frac{\mathbf{P}_{\mathcal{M}}(\tilde{y}_{nm}=1|\tilde{X}_n, S_n; \tilde{\theta}) - \mathbf{P}_{\Omega}(y_{nm}=1|X_n, S_n; \theta)}{\mathbf{P}_{\Omega}(y_{nm}=1|X_n, S_n; \theta)} = \frac{\mathbf{P}_{\mathcal{M}}(\tilde{y}_{nm'}=1|\tilde{X}_n, S_n; \tilde{\theta}) - \mathbf{P}_{\Omega}(y_{nm'}=1|X_n, S_n; \theta)}{\mathbf{P}_{\Omega}(y_{nm'}=1|X_n, S_n; \theta)} \quad (3.42)$$

L'introduction de nouvelles modalités de choix capture à chaque option déjà existante une part identique de sa demande. Il n'existe aucun effet de complémentarité, et l'effet de substitution entre les choix est neutre par rapport à leur contenu. Cet aspect mécanique du comportement de l'individu est souvent rejeté en pratique, lorsque les modalités de l'ensemble de choix exhibent des contenus contenant de nombreuses similarités.

La remise en cause de l'axiome d'indépendance à l'égard des alternatives non pertinentes peut passer par deux canaux différents : spécifier une nouvelle distribution de probabilité des perturbations prenant explicitement compte de phénomènes d'hétéroscédasticité et/ou corrélations inobservables, ou spécifier une espérance conditionnelle de l'utilité telle que chaque modalité prenne en considération les niveaux des attributs de leurs concurrentes.

L'utilisation de la transformation de Box-Cox dans la spécification des fonctions d'utilités permet d'y parvenir en généralisant la définition du processus générateur des niveaux d'utilité. Mandel, Gaudry, Rothengatter(1996) exploitent cette possibilité dans la modélisation d'un système de demande de modes de transport pour les déplacements interurbains. $\forall n \in \mathcal{P}, \forall m = 1, \dots, M$,

$$V_{nm} = \sum_{i=1}^{P_1} \theta_{1,i} \frac{X_{1, nmi}^{\lambda_i} - 1}{\lambda_i} + \sum_{i=1}^{P_2} \theta_{2,j} X_{2, nmj} + \sum_{k=1}^{P_3} \beta_{mk} S_{nk} + \sum_{m' \neq m} \sum_{i=1}^{P_1} \pi_{mm'i} \frac{X_{1, nm'i}^{\lambda_{mm'i}} - 1}{\lambda_{mm'i}}. \quad (3.43)$$

Pour que les paramètres du modèles soient identifiables relativement au paramètre de dispersion σ , l'idée est d'introduire des transformations de Box et Cox telles que si $\lambda_i = 1$, alors $\forall m, m' \in \Omega, m' \neq m, \lambda_{mm'i} \neq 1$, ou si $\forall m, m' \in \Omega, m' \neq m, \exists \lambda_{mm'i} = 1$, alors $\lambda_i \neq 1$. Il est impossible d'avoir une espérance conditionnelle qui soit totalement linéaire dans la spécification des variables explicatives. Avec la spécification (3.43), il est possible de générer des corrélations entre les alternatives, conditionnellement aux variables explicatives. Les transformations de Box et Cox étant différentes, les paramètres associés aux variables explicatives de type X_1 sont identifiables.

3.3.1 Hétéroscédasticité.

L'agrégation faite a priori par l'analyste de certaines alternatives de choix en groupes afin de pouvoir tester sa démarche dans un cadre empirique, fonction de l'information statistique observable dont il dispose, peut conduire à un ensemble d'options de choix qui sont structurellement caractérisée par des volatilités intrinsèques différentes. Dans le cadre où la fonction de distribution jointe des perturbations conduit au produit de M distributions indépendantes de Gumbel, Bhat(1995) propose une formulation adaptée du modèle logit conditionnel prenant en considération l'existence d'hétéroscédasticité des alternatives de choix. Chaque niveau d'utilité aléatoire voit sa perturbation pondérée par un facteur de dispersion différent.

$$F(\varepsilon_n | X_n, S_n; \theta) = \exp\left(-\sum_{m=1}^M \exp\left(-\frac{\varepsilon_{nm}}{\sigma_m}\right)\right) = \prod_{m=1}^M \exp\left(-\exp\left(-\frac{\varepsilon_{nm}}{\sigma_m}\right)\right) = \prod_{m=1}^M F_m(\varepsilon_{nm}). \quad (3.44)$$

La matrice de variance-covariance conditionnelle du vecteur des niveaux d'utilité est une matrice diagonale :

$$\Sigma_\varepsilon = \frac{\pi^2}{6} \begin{bmatrix} \sigma_1^2 & \cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & \sigma_M^2 \end{bmatrix} \quad (3.45)$$

Les probabilités de choix se calculent directement à partir de la définition de la probabilité de choix établie en (3.16) comme fonction de différentiels de niveaux

d'utilités aléatoires :

$$\begin{aligned} \forall m \in \Omega, \mathbf{P}_\Omega (y_{nm} = 1 | X_n, S_n; \theta) &= \int_{-\infty}^{+\infty} \left[\prod_{k \neq m} F_k \left(\frac{V_m - V_k + \varepsilon_m}{\sigma_k} \right) \right] f_m(\varepsilon_m) d\varepsilon_m = \\ &= \int_{-\infty}^{+\infty} \left[\prod_{k \neq m} \exp \left(- \exp \left(- \frac{V_m - V_k + \varepsilon_m}{\sigma_k} \right) \right) \right] d \left(\exp \left(- \exp \left(\frac{-\varepsilon_m}{\sigma_m} \right) \right) \right) = \\ &= \int_{-\infty}^{+\infty} \left[\exp \left(- \sum_{k \neq m} \exp \left(- \frac{V_m - V_k + \varepsilon_m}{\sigma_k} \right) \right) \right] d \left(\exp \left(- \exp \left(\frac{-\varepsilon_m}{\sigma_m} \right) \right) \right). \end{aligned} \quad (3.46)$$

Celles-ci n'admettent plus de forme analytique réduite. L'estimation des paramètres fait appel à l'inférence simulée, permettant l'approximation des probabilités de choix par méthode de Monte-Carlo. Nous soulignons que le modèle ainsi spécifié n'est pas identifié. Nous ne pouvons pas isoler les paramètres d'hétéroscédasticité. Ce résultat est en accord avec le caractère ordinal de la fonction d'utilité. Une stratégie d'identification consiste à choisir une modalité de référence dont la variance sert de normalisation au vecteur des utilités :

$$\Sigma_\varepsilon = \sigma_{m^*}^2 \begin{bmatrix} \frac{\sigma_1^2}{\sigma_{m^*}^2} & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & \frac{\sigma_M^2}{\sigma_{m^*}^2} \end{bmatrix} \quad (3.47)$$

Dans le cadre présent, nous devons choisir une alternative de référence m^* pour laquelle nous normalisons le paramètre d'écart-type à l'unité. L'interprétation des autres paramètres d'écart-type doit alors être faite relativement à celui de la modalité choisie pour référence. Par exemple, si nous prenons une alternative k différente de m^* , $\frac{\sigma_k}{\sigma_{m^*}} = 1.5$ signifie que la modalité k a une volatilité intrinsèque 50% plus important que la référence m^* .

3.3.2 Paramètres aléatoires.

L'hypothèse d'indépendance inconditionnelle des perturbations est restrictive dans l'interprétation du comportement du décideur. Sous l'hypothèse de distributions extrêmes, elle permet de simplifier de nombreux calculs et conduit à des expressions analytiques simples et réduites des probabilités de choix. Browstone et Train(1999), Train et McFadden(2000), Train(2003) proposent de conserver partiellement ce cadre et de l'étendre à la présence de corrélations inobservables dans la spécification de la matrice de variance-covariance conditionnelle des perturbations

du modèle. Il existe une hétérogénéité inobservée des goûts dans la population : les paramètres des variables ne sont pas invariants avec l'individu échantillonné. Aussi homogène soit l'échantillon, les relations de préférences sous-jacentes aux niveaux d'utilité des individus ne peuvent strictement identiques. Bolduc et al(2004) étudient une décomposition factorielle générale de la matrice de variance-covariance conditionnelle des perturbations. Nous focalisons ici sur une spécification hétéroscédastique de l'hétérogénéité inobservée des goûts. Elle repose sur une décomposition simple de la matrice de variance-covariance conditionnelle des perturbations. La décomposition factorielle conditionnelle aux variables explicatives observables de la matrice de variance-covariance induite par la prise en compte d'hétéroscédasticité des paramètres de goûts est cas particulier d'une décomposition plus générale, aussi présentée dans les travaux de Stern(2000). Elle permet de conserver sous une condition d'orthogonalité des perturbations avec les aléas des paramètres de goûts les formulations simples des probabilités de choix Logit obtenues sous hypothèse d'indépendance et identité des perturbations, tout en générant l'existence de corrélations inobservables entre les différentes options de choix. Les corrélations des perturbations sont conditionnelles aux variables explicatives du modèle.

Nous reprenons le processus générateur des données initial. Nous précisons l'hétéroscédasticité des paramètres de poids en les indiquant par n . Nous soulignons que les paramètres de transformation des variables explicatives sont invariants au travers de la population. Le comportement de déformation des niveaux des attributs des offres est générique. $\forall n \in \mathcal{P}, \forall m \in \Omega$,

$$u_{nm} = \sum_{i=1}^{P_1} \theta_{1,ni} \frac{X_{1,nmi}^{\lambda_i} - 1}{\lambda_i} + \sum_{i=1}^{P_2} \theta_{2,nj} X_{2,nmj} + \sum_{k=1}^{P_3} \beta_{nmk} S_{nk} + \varepsilon_{nm}. \quad (3.48)$$

Nous supposons que les paramètres aléatoires peuvent se décomposer de façon additive, sous une forme moyenne-variance, telle que :

$$\forall n \in \mathcal{P}, \forall i = 1, \dots, P_1, \theta_{1,ni} = \theta_{1,i} + \kappa_{1,i} \eta_{1,ni}, \quad (3.49)$$

où

$$\mathbf{E}(\eta_{1,ni} | X_n, S_n) = 0, \mathbf{Var}(\eta_{1,ni} | X_n, S_n) = 1, \quad (3.50)$$

et

$$\forall n \in \mathcal{P}, \forall j = 1, \dots, P_2, \theta_{2,nj} = \theta_{2,j} + \kappa_{2,j} \eta_{2,nj}, \quad (3.51)$$

où

$$\mathbf{E}(\eta_{2,nj}|X_n, S_n) = 0, \mathbf{Var}(\eta_{2,nj}|X_n, S_n) = 1, \quad (3.52)$$

et

$$\forall n \in \mathcal{P}, \forall m \in \Omega, \forall k = 1, \dots, P_3, \beta_{nmk} = \beta_{mk} + \varpi_{mk} \vartheta_{nmk}, \quad (3.53)$$

avec

$$\mathbf{E}(\vartheta_{nk}|X_n, S_n) = 0, \mathbf{Var}(\vartheta_{nk}|X_n, S_n) = 1. \quad (3.54)$$

Nous effectuons ici une approximation linéaire de l'espérance linéaire conditionnelle aux fonctions des variables explicatives. Propres à notre approche, les conditions d'orthogonalité suivantes sont supposées vérifiées. $\forall m \in \Omega, \forall n \in \mathcal{P}, \forall i = 1, \dots, P_1, \forall j = 1, \dots, P_2, \forall k = 1, \dots, P_3$, et conditionnellement à X_n, S_n :

$$\eta_{1,ni} \perp \vartheta_{nk}, \eta_{2,nj} \perp \vartheta_{nk}, \quad (3.55)$$

$$\eta_{1,ni} \perp \eta_{1,ni'} \perp \eta_{2,nj} \perp \eta_{2,nj'}, \quad (3.56)$$

$$\vartheta_{nmk} \perp \vartheta_{nmk'} \perp \vartheta_{nm'k} \perp \vartheta_{nm'k'}. \quad (3.57)$$

L'espérance conditionnelle du vecteur des niveaux d'utilité représente un comportement moyen de choix autour duquel gravite l'ensemble des comportements de toute la population. La part inobservable de l'utilité est définie $\forall n \in \mathcal{P}, \forall m \in \Omega$, par la différence

$$u_{nm} - \mathbf{E}_\theta(\mathbf{EL}(u_{nm}|g(X_n, S_n; \theta))), \quad (3.58)$$

égale à

$$v_{nm} = \varepsilon_{nm} + \sum_{i=1}^{P_1} \kappa_{1,i} \eta_{1,ni} \frac{X_{1,nmi}^{\lambda_i} - 1}{\lambda_i} + \sum_{j=1}^{P_2} \kappa_{2,j} \eta_{2,nj} X_{2,nmj} + \sum_{k=1}^{P_3} \varpi_{mk} \vartheta_{nmk} S_{nk}. \quad (3.59)$$

La matrice de variance-covariance conditionnelle du vecteur des niveaux d'utilité exhibe des corrélations conditionnelles aux variables explicatives. En notant $\forall n \in \mathcal{P}$,

$$X_{1,n}(\lambda) = \begin{bmatrix} \frac{X_{1,n11}^{\lambda_1} - 1}{\lambda_1} & \dots & \frac{X_{1,n1P_1}^{\lambda_{P_1}} - 1}{\lambda_{P_1}} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{X_{1,nM1}^{\lambda_1} - 1}{\lambda_1} & \dots & \frac{X_{1,nMP_1}^{\lambda_{P_1}} - 1}{\lambda_{P_1}} \end{bmatrix}, \quad (3.60)$$

la matrice à M lignes et P_1 colonnes,

$$X_{2,n} = \begin{bmatrix} X_{2,n11} & \cdots & X_{2,n1P_2} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ X_{2,nM1} & \cdots & X_{2,nMP_2} \end{bmatrix}, \quad (3.61)$$

la matrice à M lignes et P_2 colonnes, et

$$\tilde{S}_n = \begin{bmatrix} S'_n & \cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & S'_n \end{bmatrix}, \quad (3.62)$$

la matrice à M lignes et MP_3 colonnes, la décomposition de la matrice de variance-covariance conditionnelle du vecteur des niveaux d'utilité est définie par

$$\begin{aligned} \Sigma_v &= \sigma^2 \frac{\pi^2}{6} Id_M + X_{1,n}(\lambda) \begin{bmatrix} \kappa_{1,1}^2 & \cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & \kappa_{1,P_1}^2 \end{bmatrix} X'_{1,n}(\lambda) + \\ X_{2,n} &\begin{bmatrix} \kappa_{2,1}^2 & \cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & \kappa_{2,P_2}^2 \end{bmatrix} X'_{2,n} + \tilde{S}_n \begin{bmatrix} \varpi_{1,1}^2 & \cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & \varpi_{M,P_3}^2 \end{bmatrix} \tilde{S}'_n \end{aligned} \quad (3.63)$$

où Id_M est la matrice identité de dimension M .

Notons ψ est le vecteur des paramètres $(\kappa_{1,1}, \dots, \kappa_{2,1}, \dots, \varpi_{1,1}, \dots)$. Par construction, la densité jointe

$$\begin{aligned} f(\varepsilon_n, \eta_{1,n}, \eta_{2,n}, \vartheta_n | X_n, S_n; \theta, \psi) &= \\ h_1(\varepsilon_n | X_n, S_n; \theta) h_2(\eta_{1,n}, \eta_{2,n}, \vartheta_n | X_n, S_n; \psi). \end{aligned} \quad (3.64)$$

Nous exploitons l'indépendance entre les distributions des différents types de perturbations du modèle pour établir la forme des probabilités de choix. Sachant la valeur du paramètre θ_n , et observant $(y_n; X_n, S_n)$, la probabilité de choisir la modalité m est celle du modèle Logit multinomial. Inconditionnellement aux valeurs

des paramètres de goûts :

$$\begin{aligned}
& \forall m \in \Omega, \mathbf{P}_\Omega (y_{nm} = 1 | X_n, S_n; \psi) = \\
& \iint_D \mathbb{I}(\mathbf{A}_m v(X_n, S_n; \theta_n) \ll -\mathbf{A}_m V(X_n, S_n; \theta_n)) dF(\varepsilon_n, \eta_{1,n}, \eta_{2,n}, \vartheta_n | X_n, S_n; \theta, \psi) = \\
& \iint_D \frac{\exp\left(\frac{\sum_{i=1}^{P_1} \theta_{1,ni} \frac{X_{1,nmi}^{\lambda_i} - 1}{\lambda_i} + \sum_{i=1}^{P_2} \theta_{2,nj} X_{2,nmj} + \sum_{k=1}^{P_3} \beta_{nmk} S_{nk}}{\sigma}\right)}{\sum_{l=1}^M \exp\left(\frac{\sum_{i=1}^{P_1} \theta_{1,ni} \frac{X_{1,nli}^{\lambda_i} - 1}{\lambda_i} + \sum_{i=1}^{P_2} \theta_{2,nj} X_{2,nlj} + \sum_{k=1}^{P_3} \beta_{nlk} S_{nk}}{\sigma}\right)} dH_2(\eta_{1,n}, \eta_{2,n}, \vartheta_n | X_n, S_n; \psi)
\end{aligned} \tag{3.65}$$

où $F(\theta_n | X_n, S_n)$ est la distribution des goûts, et D est le domaine d'intégration. Ces probabilités n'ont pas de formes analytiques réduites, et doivent être approximées par simulation. L'idée est de tirer R réalisations $\eta_{1,n}^r$, $\eta_{2,n}^r$, et ϑ_{nm}^r , $r = 1, \dots, R$, des perturbations $\eta_{1,n}$, $\eta_{2,n}$, et ϑ_{nm} , dans leur loi de probabilité H_2 , ce qui nous permet de calculer $\theta_{1,n}^r$, $\theta_{2,n}^r$ et β_n^r pour chaque r et évaluer la contrepartie empirique de la probabilité ci-dessus :

$$\frac{1}{R} \sum_{r=1}^R \frac{\exp\left(\frac{\sum_{i=1}^{P_1} \theta_{1,ni}^r \frac{X_{1,nmi}^{\lambda_i} - 1}{\lambda_i} + \sum_{i=1}^{P_2} \theta_{2,nj}^r X_{2,nmj} + \sum_{k=1}^{P_3} \beta_{nmk}^r S_{nk}}{\sigma}\right)}{\sum_{l=1}^M \exp\left(\frac{\sum_{i=1}^{P_1} \theta_{1,ni}^r \frac{X_{1,nli}^{\lambda_i} - 1}{\lambda_i} + \sum_{i=1}^{P_2} \theta_{2,nj}^r X_{2,nlj} + \sum_{k=1}^{P_3} \beta_{nlk}^r S_{nk}}{\sigma}\right)}. \tag{3.66}$$

L'approximation de ces probabilités peut être ensuite utilisée à la construction d'un estimateur standard.

3.4 Le modèle Probit non ordonné et ses extensions.

Dans le contexte du modèle Probit non ordonné, initialement proposé par Thurstone(1927) pour un ensemble de choix binaire, depuis étudié et généralisé par Lerman et Mansky(1981), Stern(2000), Ben-Akiva et Bolduc(1991), Bolduc,(1999), Bolduc, Fortin et Fournier(1996), Ruud(1996), McCulloch et Rossi(1994), McCulloch, Polson et Rossi(1994), Geweke(1989), Keane(1990), Geweke, Keane et Runkle(1997), la mesure de probabilité associée à l'univers mesurable des réalisations des vecteurs

de niveaux d'utilité appartient à la famille des lois normales. Il s'agit historiquement des premières approches sur la modélisation statistique des situations de choix mutuellement exclusifs.

3.4.1 Définition.

Nous reprenons la formulation de notre processus générateur des données, définie dans la première section. $\forall n \in \mathcal{P}, \forall m = 1, \dots, M$,

$$u_{nm} = \sum_{i=1}^{P_1} \theta_{1,i} \frac{X_{1,nmi}^{\lambda_i} - 1}{\lambda_i} + \sum_{i=1}^{P_2} \theta_{2,j} X_{2,nmj} + \sum_{k=1}^{P_3} \beta_{mk} S_{nk} + \varepsilon_{nm}. \quad (3.67)$$

L'interprétation des paramètres et variables de ce processus générateur des données ne change pas. Seule la distribution des perturbations est modifiée. Leur loi jointe est désormais

$$\forall n \in \mathcal{P}, \varepsilon_n \xrightarrow{iid} \mathcal{N} \left(\begin{bmatrix} 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} \sigma_1^2 & \cdots & \sigma_{1M} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \sigma_{M1} & \cdots & \sigma_M^2 \end{bmatrix} \right). \quad (3.68)$$

Nous avons déjà discuté des contraintes identifiantes devant être imposées au modèle. Nous les supposons ici satisfaites, même si elles ne sont pas explicitées.

Nous notons Φ la fonction de répartition univariée de la loi normale centrée réduite, et φ sa densité de probabilité⁸. Dans le cadre du modèle Multinomial Probit, la probabilité de choix de la modalité m s'écrit

$$\iint_{\mathbb{R}^{M-1}} \mathbb{I}(\mathbf{A}_m \varepsilon_n << -\mathbf{A}_m V(X_n, S_n; \theta)) \varphi(\varepsilon_n | X_n, S_n; \theta) d\varepsilon_n, \quad (3.69)$$

où $\iint_{\mathbb{R}^{M-1}}$ est une intégrale de dimension $M - 1$, $\mathbb{I}(a)$ est la fonction indicatrice de l'événement a , $\varphi(\varepsilon_n | X_n, S_n; \theta)$ est la fonction de densité du vecteur des perturbations du modèle ε_n . Pour des ensembles de choix dont la dimension est strictement supérieure à 3, elles n'admettent pas de formes analytiques réduite et nécessitent le recours à la simulation pour être approximées. Nous présentons une reformulation des probabilités de choix qui permet, par échantillonnages récursifs dans les lois

⁸Nous rappelons $\forall x \in \mathbb{R}, \varphi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-x^2}$.

normales conditionnelles, de construire le simulateur proposé initialement par Geweke(1989), Hajivassiliou(1993) et Keane(1990), et dont les propriétés sont exposées en détail dans l'article de Hajivassiliou, McFadden et Ruud(1996).

Nous pouvons réécrire la probabilité (3.69) par décomposition de Cholesky⁹ \mathbf{L}_m de la matrice de variance-covariance du vecteur transformé $\mathbf{A}_m \varepsilon_n$, de telle façon que le nouveau vecteur aléatoire ζ_{nm} soit centré, de variance unité et normalement distribué :

$$\begin{aligned} \iint_{\mathbb{R}^{M-1}} \mathbb{I}(\mathbf{L}_m \zeta_{nm} \ll -\mathbf{A}_m V(X_n, S_n; \theta) | X_n, S_n; \theta) \varphi(\zeta_{nm} | X_n, S_n; \theta) d\zeta_{nm} = \\ \mathbf{E}(\mathbb{I}(\mathbf{L}_m \zeta_{nm} \ll -\mathbf{A}_m V(X_n, S_n; \theta) | X_n, S_n; \theta) | X_n, S_n; \theta) \end{aligned} \quad (3.70)$$

L'évaluation de cette intégrale à $M - 1$ dimensions a suscité le développement de nombreuses techniques. Lorsque $M \leq 3$, les méthodes d'approximation par quadrature restent les plus appropriées. Lorsque $M \geq 4$, le recours aux techniques de simulation par méthodes de Monte-Carlo restent les seules à envisager.

L'idée la plus simple conduit à la définition du simulateur de fréquence proposé par Lerman et Manski(1981). Elle consiste à tirer R réalisations ζ_{nm}^r , $r = 1, \dots, R$, du vecteur ζ_{nm} dans sa loi normale centrée réduite de dimension $M - 1$ et évaluer par sa contrepartie empirique l'espérance ci-dessus :

$$\frac{1}{R} \sum_{r=1}^R \mathbb{I}(\mathbf{L}_m \zeta_{nm}^r \ll -\mathbf{A}_m V(X_n, S_n; \theta) | X_n, S_n; \theta). \quad (3.71)$$

Ce simulateur laisse apparaître des limites importantes dans le cadre d'estimation de modèles paramétriques. Pour chaque rééchantillonnage, la probabilité de réalisation est soit 0, soit 1. Il est alors possible au cours de ceux-ci qu'une probabilité de réalisation soit toujours nulle. Dans ce cas, les estimateurs classiques du maximum de vraisemblance ou du score ne sont pas définis et nous ne pouvons pas recourir aux méthodes usuelles d'optimisation¹⁰. Il s'agit d'une fonction non conti-

⁹Nous rappelons que ce sont des matrices triangulaires inférieures de dimension $M - 1$, dont nous notons l'expression $\forall n \in \mathcal{P}, \forall m = 1, \dots, M, \mathbf{L}_m = \begin{bmatrix} l_{11,m} & \cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ l_{M-1,1,m} & \cdots & l_{M-1,M-1,m} \end{bmatrix}$, et dont les éléments $l_{ij,m} \equiv l_{ij,m}(\theta)$, $i = 1, \dots, M - 1, j \leq i$, sont définis de façon unique.

¹⁰Ceci peut être surmonté en recourant à des méthodes d'optimisation purement numériques par "Grid Search"

nue, dont les dérivées ne sont pas définies en tout point. L'expérience montre aussi qu'un très grand nombre de rééchantillonnages est requis afin d'obtenir une variance suffisamment faible du simulateur et de faire disparaître les biais de simulation dans l'évaluation des paramètres.

Compte tenu de la faiblesse des résultats empiriques obtenus à partir des simulateurs de fréquences, il faut retravailler les possibilités d'évaluation de ces probabilités de réalisation d'événements sous contraintes. L'échantillonnage d'importance permet de réécrire l'espérance initiale relativement à une autre distribution plus facile à utiliser. Un échantillonneur d'importance doit vérifier les conditions suivantes :

1. Il est facile de tirer des réalisations de la nouvelle distribution.
2. La nouvelle distribution a le même support ou un support plus petit que celui de la distribution initiale.
3. La nouvelle distribution permet une évaluation simple du problème lié au calcul numérique de l'intégrale multiple.
4. La nouvelle distribution est continue et bornée sur son support.

La probabilité de choix de la modalité m peut-être écrite en terme de sa fonction de répartition. En exploitant la règle de conditionnement de Bayes, et par la structure triangulaire de \mathbf{L}_m , nous pouvons établir pour égalité

$$\Pr(\mathbf{L}_m \zeta_{nm} \ll -\mathbf{A}_m V(X_n, S_n; \theta) | X_n, S_n; \theta) = \prod_{j=1}^{M-1} \Pr(Q_j | Q_{<j}, X_n, S_n; \theta), \quad (3.72)$$

où

$$\forall j = 1, \dots, M-1, Q_j(\zeta_{nm}) = \begin{cases} \zeta_{nm,j} < -\frac{\mathbf{A}_m V(X_n, S_n; \theta) + \sum_{i=1}^{j-1} l_{m,ji}(\theta) \zeta_{nm,i}}{l_{m,jj}(\theta)}, j > 1 \\ \zeta_{nm,j} < -\frac{\mathbf{A}_m V(X_n, S_n; \theta)}{l_{m,jj}(\theta)}, j = 1 \end{cases}, \quad (3.73)$$

et où le symbole $Q_{<j}$ signifiant le conditionnement par toutes les inégalités précédant la j -ième. L'intégrale de l'équation (3.70) peut être réécrite

$$\iint_{\mathbb{R}^{M-1}} \mathbb{I}(\mathbf{L}_m \zeta_{nm} \ll -\mathbf{A}_m V(X_n, S_n; \theta) | X_n, S_n; \theta) * \prod_{j=1}^{M-1} \Pr(Q_j | Q_{<j}, X_n, S_n; \theta) \prod_{j=1}^{M-1} \frac{\varphi(\zeta_{nm,j} | X_n, S_n; \theta)}{\Pr(Q_j | Q_{<j}, X_n, S_n; \theta)} d\zeta_{nm}. \quad (3.74)$$

La distribution $\prod_{j=1}^{M-1} \frac{\varphi(\zeta_{nm,j} | X_n, S_n; \theta)}{\Pr(Q_j | Q_{<j}, X_n, S_n; \theta)}$ s'interprète directement : il s'agit du produit

de lois normales univariées tronquées, et dont les troncatures respecte les inégalités définies dans (3.73).

Tirer récursivement des réalisations ζ_{nm}^r , $r = 1, \dots, R$, dans ces lois tronquées nous assure de satisfaire avec probabilité égale à 1 l'événement $\{\mathbf{L}_m \zeta_{nm} < -\mathbf{A}_m V(X_n, S_n; \theta) | X_n, S_n; \theta\}$. De fait, l'expression ci-dessus se simplifie et devient

$$\iint_{\mathbb{R}^{M-1}} \prod_{j=1}^{M-1} \Pr(Q_j | Q_{<j}, X_n, S_n; \theta) \prod_{j=1}^{M-1} \frac{\varphi(\zeta_{nm,j} | X_n, S_n; \theta)}{\Pr(Q_j | Q_{<j}, X_n, S_n; \theta)} d\zeta_{nm}. \quad (3.75)$$

L'échantillonnage de réalisations dans une loi normale univariée tronquée est simplement effectué en utilisant la relation

$$\zeta_{nm,j}^r \leftarrow \phi^{-1} \left(u_{nm,j}^r \phi \left(-\frac{\mathbf{A}_m V(X_n, S_n; \theta) + \sum_{i=1}^{j-1} l_{m,ji}(\theta) \zeta_{nm,i}^r}{l_{m,jj}(\theta)} \right) \right),$$

où $u_{nm,j}^r$ est un tirage dans une loi uniforme. Fixons r . En commençant par $j = 1$, nous tirons une réalisation $\zeta_{nm,1}^r$ dans la loi de $\zeta_{nm,1}$ sachant $\zeta_{nm,1} < -\frac{\mathbf{A}_m V(X_n, S_n; \theta)}{l_{m,11}(\theta)}$. Pour $j = 2$, nous échantillons $\zeta_{nm,2}^r$ dans la loi de $\zeta_{nm,2}$ sachant $\zeta_{nm,2} < -\frac{\mathbf{A}_m V(X_n, S_n; \theta) + l_{m,21}(\theta) \zeta_{nm,1}^r}{l_{m,22}(\theta)}$ et $\zeta_{nm,1} < -\frac{\mathbf{A}_m V(X_n, S_n; \theta)}{l_{m,11}(\theta)}$. Nous utilisons le résultat du tirage $\zeta_{nm,1}^r$ satisfaisant la seconde inégalité et nous tirons $\zeta_{nm,2}^r$ dans la loi de $\zeta_{nm,2}$ sachant $\zeta_{nm,2} < -\frac{\mathbf{A}_m V(X_n, S_n; \theta) + l_{m,21}(\theta) \zeta_{nm,1}^r}{l_{m,22}(\theta)}$. Nous procédons ainsi de suite jusqu'à $j = M - 1$ en utilisant les tirages conditionnels antérieurs à j pour celui du j -ième résidu dans sa loi tronquée. Nous obtenons un vecteur ζ_{nm}^r avec lequel nous pouvons évaluer les Q_j^r et donc $\prod_{j=1}^{M-1} \Pr(Q_j^r | Q_{<j}^r, X_n, S_n; \theta)$. Pour un nombre R de tirages, nous approximations l'intégrale par sa contrepartie empirique

$$\frac{1}{R} \sum_{r=1}^R \prod_{j=1}^{M-1} \Pr(Q_j^r | Q_{<j}^r, X_n, S_n; \theta).$$

Ce simulateur est un estimateur sans biais de la probabilité de choix., de plus petite variance que le simulateur de fréquence. Il possède des propriétés de continuité qui lui permettent de s'accorder avec les méthodes standard d'optimisation.

3.4.2 Cas particuliers.

Les cas particuliers présentés ci-après sont analogues à ceux présentés pour le modèle Logit. D'autres contextes sont envisageables et dépendent des considérations théoriques et pratiques du modélisateur. Nous présentons ici les spécifications les plus courantes.

Indépendance et identité.

Le cadre le plus simple est celui où les perturbations sont indépendamment et identiquement distribuées. Bien entendu, le modèle ainsi spécifié est nettement sur-identifié. Leur distribution jointe est

$$\forall n \in \mathcal{P}, \varepsilon_n \stackrel{iid}{\rightarrow} \mathcal{N} \left(\begin{bmatrix} 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix}, \sigma^2 \begin{bmatrix} 1 & \cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & 1 \end{bmatrix} \right). \quad (3.76)$$

La propriété suivante sur les matrices transformées des variances et covariances des perturbations est impliquée par les hypothèses d'indépendance et identité :

$$\forall m \in \Omega, \Xi_m = \Xi = \sigma^2 \begin{bmatrix} 2 & 1 & \cdots & 1 \\ 1 & 2 & \ddots & \vdots \\ \vdots & \ddots & \ddots & 1 \\ 1 & \cdots & 1 & 2 \end{bmatrix}. \quad (3.77)$$

Les transformations de la matrice de variance-covariance conduisent aux mêmes décomposition de Cholesky, s'exprimant de façon unique relativement au paramètre de variance. En dehors du paramètre de dispersion de la loi jointe des perturbations transformées, la décomposition de Cholesky ne fait intervenir que des constantes. Suridentifié, le modèle est plus facile à estimer. Les paramètres de l'espérance linéaire conditionnelle à des fonctions des variables explicatives s'expriment relativement au paramètre σ . Les probabilités de choix prennent la forme suivante, les éléments de

la décomposée de Cholesky étant des constantes connues :

$$\iint_{\mathbb{R}^{M-1}} \prod_{j=1}^{M-1} \Pr(Q_j | Q_{<j}, X_n, S_n; \theta) \prod_{j=1}^{M-1} \frac{\varphi(\zeta_{nm,j} | X_n, S_n; \theta)}{\Pr(Q_j | Q_{<j}, X_n, S_n; \theta)} d\zeta_{nm}, \quad (3.78)$$

où

$$\forall j = 1, \dots, M-1, Q_j(\zeta_{nm}) = \begin{cases} \zeta_{nm,j} < -\frac{\mathbf{A}_m V(X_n, S_n; \theta) + \sum_{i=1}^{j-1} l_{m,ji} \zeta_{nm,i}}{l_{m,jj}}, j > 1 \\ \zeta_{nm,j} < -\frac{\mathbf{A}_m V(X_n, S_n; \theta)}{l_{m,jj}}, j = 1 \end{cases}, \quad (3.79)$$

Même dans le contexte de perturbations *iid*, l'inférence simulée s'impose comme méthode d'estimation pour des ensembles de choix de dimensions strictement supérieure à 3. Nous soulignons que la loi normale permet de surpasser l'axiome d'indépendance à l'égard des alternatives non pertinentes dans le cadre où indépendance et iso-distribution des perturbations coexistent.

Paramètres aléatoires.

L'hétéroscédasticité inobservée des goûts des décideurs peut être conçue de façon analogue au modèle Logit à paramètres aléatoires. La distribution des perturbations ε_n reste le produit de loi normales univariées centrées, de même variance, et deux à deux indépendantes :

$$\forall n \in \mathcal{P}, \varepsilon_n \stackrel{iid}{\rightarrow} \mathcal{N} \left(\begin{bmatrix} 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} \sigma^2 & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & \sigma^2 \end{bmatrix} \right). \quad (3.80)$$

Le processus générateur des données est toujours

$$u_{nm} = \sum_{i=1}^{P_1} \theta_{1,ni} \frac{X_{1,nmi}^{\lambda_i} - 1}{\lambda_i} + \sum_{i=1}^{P_2} \theta_{2,nj} X_{2,nmj} + \sum_{k=1}^{P_3} \beta_{nmk} S_{nk} + \varepsilon_{nm}, \quad (3.81)$$

et la différence

$$u_{nm} - \mathbf{E}_\theta(\mathbf{EL}(u_{nm} | g(X_n, S_n; \theta))), \quad (3.82)$$

définit la part inobservable de l'utilité, conditionnelle aux fonction des variables explicatives. Elle est égale sous les hypothèses données par les équations 3.49 jusqu'à 3.57,

$$v_{nm} = \varepsilon_{nm} + \sum_{i=1}^{P_1} \kappa_{1,i} \eta_{1,ni} \frac{X_{1,nmi}^{\lambda_i} - 1}{\lambda_i} + \sum_{i=1}^{P_2} \kappa_{2,j} \eta_{2,nj} X_{2,nmj} + \sum_{k=1}^{P_3} \varpi_{mk} \vartheta_{nmk} S_{nk}. \quad (3.83)$$

Les probabilités de choix se déduisent en utilisant les hypothèses d'indépendance entre les perturbations, et l'hypothèse donnée dans l'équation 3.80. $\forall n \in \mathcal{P}, \forall m \in \Omega$,

$$\iint_D \prod_{j=1}^{M-1} \Pr(Q_j | Q_{<j}, X_n, S_n; \theta_n) \prod_{j=1}^{M-1} \frac{\varphi(\zeta_{nm,j} | X_n, S_n; \theta_n)}{\Pr(Q_j | Q_{<j}, X_n, S_n; \theta_n)} d\zeta_{nm} dH_2(\eta_{1,n}, \eta_{2,n}, \vartheta_n | X_n, S_n; \psi) \quad (3.84)$$

où θ_n , H_2 et ψ gardent la même interprétation que dans le cadre du modèle Logit à paramètres aléatoire (voir les équations (3.64, 3.65)), et où

$$\forall j = 1, \dots, M-1, Q_j(\zeta_{nm}) = \begin{cases} \zeta_{nm,j} < -\frac{\mathbf{A}_m V(X_n, S_n; \theta) + \sum_{i=1}^{j-1} l_{m,ji} \zeta_{nm,i}}{l_{m,jj}}, j > 1 \\ \zeta_{nm,j} < -\frac{\mathbf{A}_m V(X_n, S_n; \theta)}{l_{m,jj}}, j = 1 \end{cases}. \quad (3.85)$$

Conclusion.

Les propriétés analytiques du modèle Logit et de ses extensions ont assis sa prédominance sur une spécification Probit des probabilités de choix, notamment dans le domaine de la modélisation de la demande de transport. La manipulation des probabilités de choix lorsque les perturbations sont distribuées selon une loi normale est plus difficile. Lorsque les ensembles de choix sont binaires, les deux familles de lois sont simples à mettre en oeuvre. De moins en moins vérifié avec l'accroissement des capacités de calcul informatique, le modèle Probit non ordonné est plus complexe à rendre opérationnel. Lorsque la dimension de l'ensemble de choix est strictement supérieur à 3, le recours à l'inférence simulée est nécessaire pour l'estimation numérique des paramètres identifiables, même dans le cadre simple où les perturbations sont indépendamment et identiquement distribuées. Dans le domaine de recherche sur la demande de transport, il s'agit d'une approche beaucoup moins exploitée depuis les extensions récentes de la famille des lois extrêmes généralisées, autorisant à la fois la présence de corrélations inobservables dans la matrice de variance-covariance

des perturbations et une expression analytique réduite des probabilités de choix. Nous soulignons dans ce dernier cas que les similarités inobservables entre les options de choix doivent être explicitement formulées. Quelle que soit la spécification de la matrice de variance-covariance des perturbations, le modèle Probit non ordonné n'impose pas le respect obligatoire de l'axiome d'indépendance à l'égard des alternatives non pertinentes : l'introduction de nouvelles options dans l'ensemble de choix a un impact différencié sur les possibilités déjà existantes. Le ratio de deux probabilités de choix varie avec la taille et le contenu de l'ensemble dans lequel elles sont présentes.

La loi extrême de type 1 admet une interprétation probabiliste plus réaliste que la loi normale. Elle est asymétrique, la queue droite de sa distribution étant épaisse. Elle signifie que la probabilité de ne pas observer un événement favorisant un choix particulier est non nulle. Les réalisations extrêmes des facteurs inobservables causant le choix effectif ont des probabilités non nulles d'apparition. La loi normale assigne 99% de sa masse de probabilité à des réalisations situées dans un intervalle symétrique centré autour de la moyenne de demi longueur égale à 3 fois l'écart-type de la distribution. Elle suggère une probabilité nulle de ne pas observer un événement exceptionnel causant le choix effectif du consommateur. Symétrique, elle suggère une probabilité nulle de ne pas observer un événement extrême désincitant le décideur à choisir une option particulière. La distribution extrême de type 1 conduit à une interprétation économique plus rigoureuse du modèle probabiliste de maximisation de l'utilité. La propriété de max-stabilité permet avec les conditions classiques de maximisation des préférences sous contrainte budgétaire de définir les probabilités de choix comme des fonctions de demandes pour les différentes modalités de l'ensemble de choix.

Les méthodes d'estimation sont aujourd'hui bien développées. Lorsque les probabilités de choix admettent une forme analytique réduite, l'estimateur du maximum de vraisemblance est simple à mettre en oeuvre. Lorsque les probabilités de choix prennent la forme d'intégrales multiples, l'estimateur du maximum de vraisemblance simulée est utilisé. Nous en rappelons les conditions d'existence et les propriétés en annexe. Les différents types et propriétés d'estimateurs classiques peuvent être trouvées dans les ouvrages de Gourieroux(1989), Gourieroux et Montfort(1989) et Maddala(1983), et l'article de Newey et McFadden(1994). Les travaux de Lerman et Mansky(1981), Hajivassiliou(1993, 2000), Hajivassiliou et Ruud(1994), Hajivassiliou et McFadden(1997), Pakes et Pollard(1989), McFadden(1989) et l'ouvrage de

Gourieroux(1989), détaillent les propriétés des estimateurs simulés. Ces derniers reposent sur des méthodes d'échantillonnages adaptés aux hypothèses structurelles du modèle. Le modèle Probit non ordonné a fait l'objet du développement d'un simulateur particulier, nommé GHK, proposé par Geweke(1989), Hajivasiliou(1993), Keane(1990) De nombreux types de simulateurs sont envisageables. Les travaux de Hajivassiliou, McFadden et Ruud(1996) à ce sujet sont exhaustifs.

Dans un cadre empirique, nous ne connaissons pas le vrai processus générateur des données. Plusieurs modèles doivent être mis en perspective et leurs mesures de performance doivent être comparées. Ils doivent être testés les uns contre les autres, certains étant le résultat de restrictions sur les paramètres d'une spécification plus générale.

Chapitre 4

Déplacements domicile-travail et choix du mode de transport en Ile-de-France : variations autour d'un thème.

Introduction.

La demande de transport est un mélange de décisions à long terme et à court terme, voir à ce sujet les travaux de McFadden(1974), le livre de Domenich et McFadden(1975), mais aussi l'article récent de Ben-Akiva et Bierlaire(1999). Plusieurs critères sont à considérer lors de sa formulation. Nous pouvons raisonnablement les regrouper en cinq composantes distincts : le choix du lieu de résidence et du lieu de travail, le choix des destinations lors de la réalisation d'activités, le choix du mode de transport, et les choix des itinéraires et horaires des déplacements. Les deux premières composantes interviennent essentiellement à long terme, tandis que les autres s'ajustent plus volontiers lors de l'organisation des activités programmées dans le calendrier. Les choix de résidence, destination, mode et route ont donnés naissance au modèle "universel" de demande de transport (voir McFadden(2000) pour un exposé plus détaillé). La prise en compte des choix horaires dans les modèles de prévision

des flux de trafic est un développement récent, comme le souligne le projet QUATUOR(1999) établi pour la région Ile-de-France, et dépend étroitement des motifs de déplacement et des caractéristiques de l'individu et de son ménage (Bhat(1998)). Il est reconnu depuis quelques temps déjà que la demande de transport est sensible à ce pour quoi elle est émise. Soulignée dans le rapport MVA(1987), la motivation à destination joue un rôle important, et le marché des transports est alors étroitement lié au marché de l'activité à réaliser lors de l'organisation du déplacement. Nous nous focalisons dans ce chapitre sur les déplacements réguliers domicile-travail, pour lesquels les localisations des lieux de résidence et travail sont données, et nous nous intéressons en particulier au choix du mode de transport. Nous supposons les choix horaires et routiers résolus de telles façons que nous puissions disposer des variables de marché (prix et temps) des alternatives de déplacement. Notre analyse fondée sur un type de déplacement particulier ne permet pas de prendre en compte l'organisation et la dynamique calendaire de la totalité des activités d'un individu et ne reflète pas la nature obligatoire ou non des activités à réaliser, ni les interrelations existant entre tous les voyages. L'objet des modèles fondées sur les calendriers d'activités et/ou les circuits fermés de déplacements est d'intégrer cet aspect dans l'analyse des choix de déplacements et de la façon dont ils sont réalisés : destinations, heures,... Ben-Akiva et de Palma(1996), Ben-Akiva et Bowman(1998) développent dans un contexte opérationnel ces approches.

Les modèles de choix du mode de transport définis au niveau de l'individu fournissent une analyse des déterminants de la demande et servent à la mesure d'impacts suivant une politique économique ou suivant une modification des infrastructures de transport présentes dans une région. Ils sont aussi très répandus pour l'analyse et la prévision liée à l'introduction de nouvelles alternatives, complémentaires ou substituables à celles déjà existantes. D'un point de vue plus général, nous devons comprendre et examiner les déterminants du choix d'un mode de transport afin de pouvoir évaluer l'efficacité d'une politique économique favorisant, ou défavorisant, son usage : inciter à l'usage des transports en commun afin de réduire les niveaux de pollution atmosphérique en milieu urbain, introduire de nouveaux types de véhicule motorisés et/ou de nouveaux transports en commun, construire de nouveaux segments routiers, accroître les capacités de certains arcs routiers, modifier les grilles de fréquences des transports en commun,.... Au niveau de l'individu, celui-ci va réagir à toute modification des conditions d'offre : en particulier, il va être sensible aux conditions de circulation et à la durée qu'il met pour se déplacer. Dans le but

d'aller toujours plus vite pour réaliser les activités intermédiaire telle le transport, l'individu va arbitrer entre coût du trajet et temps du trajet. A son équilibre, pour une demande de mobilité donnée, si modification de la durée il y a, l'individu sera alors capable d'évaluer la perte de satisfaction qu'elle engendre et ainsi valoriser le prix qu'il est prêt à payer pour éviter cette situation et maintenir le même niveau de bien-être, toutes choses égales par ailleurs. Réciproquement, il est important de pouvoir mesurer le gain de bien-être lié à une amélioration des conditions de déplacement : cela permet alors de mesurer la propension à payer des voyageurs pour obtenir cette situation. Dans les projets d'investissement en infrastructures de transport, cela apparaît comme un élément clé de la tarification à adopter pour le développer et le rentabiliser. De nombreuses études ont été faites sur la valeur du temps de transport et ses propriétés, par exemple Wardman et Mackie(1997) pour la Grande-Bretagne, le rapport TRACE(1997), Piron(1996), O'Dea(1994), McFadden(1998), Lee et Dalvi(1969), Jennings et Sharp(1976), Jara-Diaz(1990), Hensher(1977,1989,2001), Gunn, Chen, et Van de Vyvere(1996), Quarmby(1967), McFadden et Train(1978), de Palma et Fontan(2001), Abraham et Blanchet(1973), Arduin, Ni et Pick(1994). Dans ce chapitre, nous étudions cet arbitrage dans le cadre du choix du mode de transport pour les déplacements domicile-travail en milieu urbain.

4.1 Présentation des données.

Trois types de bases de données sont exploitées pour l'estimation de nos modèles. L'une concerne une enquête de transport de type préférences révélées, l'autre résulte de l'affectation des flux de transports sur les différents réseaux, et la dernière représente l'information sur les coûts de transport. Nous utilisons un sous-échantillon de l'enquête de 1997, mis à disposition par monsieur le professeur André de Palma et l'institut d'aménagement urbain de la région Ile-de-France (IAURIF).

4.1.1 L'enquête générale de transport, 1997.

L'Enquête Générale de Transport (EGT) constitue la source d'information la plus détaillée la plus détaillée pour les études de mobilité au sein de la région Ile-de-France. Elle permet de croiser les caractéristiques socio-économiques et familiales des franciliens avec leurs pratiques de transport quotidien, un jour de la semaine, et

leurs pratiques en fin de semaine. L'enquête est pilotée par la division des infrastructures et des transports de la DREIF, financée conjointement par l'Etat, le conseil régional et la ville de Paris, l'INSEE, le syndicat des transports d'Ile-de-France¹, la régie autonome des transports parisiens (RATP), la SNCF, et la société concessionnaire du réseau autoroutier de la région, Cofiroute. Chacun peut accéder aux informations de la base, utiliser les éléments recueillis pour valider ses projets d'investissement, ou pour envisager de nouveaux développements. Cinq enquêtes ont eu lieu, en 1976, en 1983, en 1991, en 1997, et en 2002, mobilisant de nombreuses ressources humaines et financières. Elles s'appuient sur un échantillon représentatif de la population francilienne, tant par les caractéristiques sociales que géographiques.

EGT-97 a pour but de fournir une description de l'ensemble des déplacements des personnes à l'intérieur de la région d'Ile-de-France. Elle permet d'établir une vision transitoire entre l'enquête de 1991 et l'enquête 2002, plus importantes. Les thèmes abordés par les questionnaires permettent de caractériser la composition socio-démographique et l'équipement en moyens de transport des ménages interrogés, et d'analyser finement leurs déplacements. L'enquête porte sur un échantillon de 7 000 ménages franciliens tirés dans chacune des trois zones principales, Paris, petite couronne et grande couronne, préservant la représentativité par département. Pour notre application, nous ne disposons pas de l'enquête complète, mais seulement d'un échantillon qui a servi à l'actualisation du modèle en 1998. Les opérations allant de la confection du plan de sondage à la production du fichier-détail de l'enquête sont confiées à la direction régionale de l'INSEE, division "Enquêtes auprès des ménages". En pratique, cette enquête est réalisée au domicile des ménages retenus dans l'échantillon, usagers des systèmes de transport. L'information recueillie est saisie directement sous format numérique de façon à minimiser les erreurs de reports et/ou mesures des informations collectées. Le questionnaire "déplacements jours de semaine" s'établit au niveau de l'individu et permet d'obtenir un niveau de détail élevé sur l'ensemble de ses déplacements durant une journée spécifique. Parmi les informations collectées, nous notons par exemple l'adresse précise des origines et destinations, les horaires de départs et d'arrivées de chacun des voyages entre ces localisations, l'ensemble des modes de transport utilisés. Nous disposons également d'informations diverses pour chaque type de mode de déplacement, concernant la possession de titres de transport, le bénéfice d'indemnités de déplacement, le type de stationnement aux destinations, la propriété du véhicule utilisé, le nombres de

¹STIF, anciennement le syndicat des transports parisiens (STP).

correspondances en transports en commun, Nous disposons aussi d'informations focalisant sur l'individu. Elles décrivent sa personne (âge, sexe,...), sa situation sociale (profession et catégorie sociale,...), ses motifs de déplacements et les contraintes associées,... Un questionnaire "ménage" complète cette information. Les données recueillies caractérisent la situation générale de l'ensemble des membres du ménage auquel appartient l'individu interrogé. Nous citons pour exemple la taille du ménage, le nombre d'automobiles disponibles, le revenu brut total du ménage, le type de logement. L'avantage de l'EGT réside à la fois dans son approche au niveau de l'individu et la diversité des informations recueillies. Il s'agit d'une enquête de type "préférences révélées", c'est-à-dire que seuls les choix effectifs de déplacements sont reportés. Seule, cette base de données n'autorise pas l'analyse du processus de comparaison des différentes possibilités s'offrant à l'individu ex ante à son choix. Cet objectif nécessite de disposer d'informations complémentaires.

4.1.2 La reconstruction des offres de transport.

L'ensemble de choix : modes de transport.

Lorsque nous nous intéressons au choix d'un mode de transport, nous devons préciser la nature de l'ensemble de choix \mathcal{M} auquel fait face le preneur de décision. Il est discret et composé de M alternatives $m = 1, \dots, M$ mutuellement exclusives. Il décrit l'ensemble des alternatives accessibles à l'individu. Nous ne nous intéressons ici qu'au choix du mode de transport pour un déplacement domicile-travail. Des hypothèses préalables sont nécessaires pour fixer les choix de l'individu sur les autres facteurs constitutifs de sa demande de transport. Premièrement, nous supposons connu le lieu de résidence et celui du travail de l'individu. Le choix de localisation du ménage sont donnés. Les lieux de résidence et du travail de l'individu détermine l'ensemble des caractéristiques des offres de transport sur ce corridor origine-destination : il joue sur le choix du mode de transport résultant. Dans ce contexte, notre analyse des choix de transports prend forme dans un contexte de court terme. A ce titre, nous supposons aussi que le stock de capital automobile du ménage est donné. Ce choix détermine l'éventuelle présence de contraintes d'utilisation d'un véhicule particulier que plusieurs membres ont à se partager et influe sur le choix du mode de transport. Concernant les choix de l'horaire et de l'itinéraire du voyageur, certaines règles heuristiques sont utilisées. Ne disposant pas de l'information nécessaire pour gérer ces problématiques, nous raisonnons en déduisant les choix optimaux de l'individu

sur son horaire et itinéraire de déplacement à partir de ces règles. Nous soulignons qu'elles permettent de générer les temps et coûts de trajet auxquels le travailleur fait face dans chaque mode de transport. Nous les discutons plus avant dans le calcul des coût et des temps des trajets domicile-travail de l'échantillon.

La prédétermination de certains choix a des incidences sur la compréhension du choix du mode de transport, puisque nous effaçons l'aspect simultanée des décisions. Nous raisonnons conditionnellement à certains choix : nous devons être prudents sur les effets indirects causés par la présence de variables explicatives résultant d'autres choix, eux-mêmes conditionnés par d'autres variables explicatives aussi présentes dans la description du choix du mode de transport.

Nous tenons à préciser qu'initialement, lors de l'enquête, les alternatives proposées au sondé caractérisant le mode de transport qu'il révèle utiliser sont très détaillées. Concernant l'enquête de 1997, le codage du mode de transport offre 22 alternatives distinctes pour le mode de transport. La taille de notre échantillon ne nous permet pas d'exploiter cette diversité. Les modes de transports sont agrégés en types génériques. Elles sont regroupées pour notre application en deux modes génériques de transport : véhicule particulier (VP) et transports en commun (TC). Chacun d'entre eux est composé de sous types distincts : conducteur seul ou accompagné ou passager transporté en VP, bus, métro, train ou une combinaison de ceux-ci pour les TC. Nous excluons tous les individus se déplaçant à l'aide de modes non motorisés, et les phénomènes d'intermodalité ne sont pas capturés dans la description des comportements de choix. Cet aspect restrictif ne rend pas pour autant irréalistes les résultats et interprétations de nos modèles présentés plus avant. Nous perdons cependant en précision et finesse de la description des choix de modes de transport.

Les réseaux de transport : calculs des temps de trajet.

Les résultats du modèle d'affectation des flux de l'Institut d'Aménagement Urbain Régional d'Ile-de-France (IAURIF) sont utilisés pour la construction des ensembles de choix de transport des voyageurs. Il nous permet de reconstruire les réalisations des variables de temps de trajets des individus pour les alternatives auxquelles il font face avant de choisir celle qu'ils ont reporté dans le questionnaire. Ce modèle suit la démarche classique en quatre étapes et repose sur un découpage de l'Ile-de-France en 488 zones. Les réseaux routiers et de transports en commun de ré-

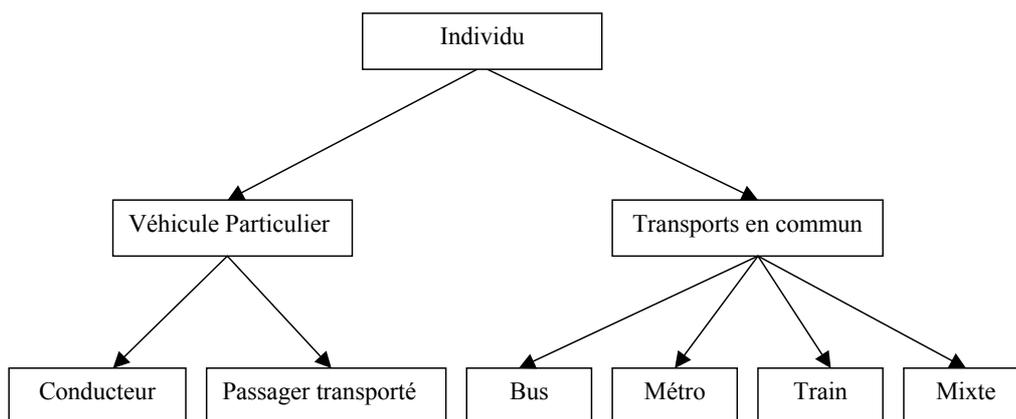


FIG. 4-1 – Désagrégation des modes de transport.

férence 1994 ont été extraits des axes du Plan d’Occupation du Sol de l’IAURIF. Le premier comporte 6800 arcs et 4500 nœuds et le réseau ferré de référence comprend le réseau lourd (SNCF et RATP) ainsi que les principales lignes de bus, soit 2900 arcs et 1000 nœuds. Le module d’affectation permet d’obtenir pour le réseau routier sur chaque arc orienté la charge, le taux d’occupation, la vitesse résultante et les flux aux niveaux des nœuds. L’affectation peut se faire avec ou sans contrainte de capacité, et respecte le premier principe de Wardrop(1952). Pour le réseau ferré, l’affectation est effectuée au plus court chemin et sans contrainte de capacité. Le calibrage du système de demande est effectuée à l’aide des données EGT et diverses sources d’information statistique (enquête cordon en limite de région, entrants-sortants Grandes Lignes SNCF, trafic ADP). A l’issue de l’étape d’affectation du modèle de l’IAURIF, nous estimons pour chaque paire origine-destination le temps de trajet sur le réseau routier et sur le réseau des transports en commun.

Les coûts de transport.

L’utilisation de données exogènes est nécessaire pour le calcul des coûts des déplacements. Pour l’utilisation d’un véhicule particulier, le coût est déterminé par la distance parcourue multipliée par un coût kilométrique de 1.84FF (estimation du STIF en 1997) représentant le coût du carburant, du graissage et de l’entretien des véhicules et du stationnement payant non pris en charge par l’employeur. Pour le réseau des transports en commun, le coût est celui de la carte orange mensuelle rapporté à un déplacement domicile-travail lorsque l’individu dispose d’un abonnement de transport. Lorsque ce n’est pas le cas, le coût unitaire du déplacement est extrait

de la grille tarifaire de l'opérateur utilisé. L'abattement tarifaire, lié à la prise en charge partielle du déplacement domicile-travail par l'employeur, est intégrée dans le calcul du prix du trajet domicile-travail.

4.1.3 Description de l'échantillon.

Notre base de données ne constitue qu'un sous échantillon de l'EGT 97. Il convient de décrire plus précisément les caractéristiques statistiques de sa population, celles-ci ne garantissant plus la représentativité des travailleurs franciliens. Nous soulignons de nombreux a priori, suggérant le profil notre échantillon comme relativement peu éloigné de celui de la population active de la région Ile-de-France.

Notre échantillon est construit en regroupant la base de donnée mise à jour de l'EGT et les résultats d'affectation du modèle de l'IAURIF(1997). Nous renvoyons le lecteur au papier de Fontan et de Palma(1999) pour une présentation exhaustive de la base de donnée et du modèle d'affectation des flux de trafic sur les réseaux routiers et ferroviaire. Il considère des individus actifs, résidant et travaillant au sein de l'espace géographique définissant la région Ile-de-France. Nous ne considérons que les travailleurs réguliers, sans changement de statut de salarié² au cours de la période de sondage, ni horaires de travail les jours de fin de semaine (samedi et dimanche). 865 observations sont disponibles : les individus sont âgés entre 18 et 64 ans. Les déplacements domicile-travail ont tous lieu entre 07H00 et 10H00 du matin, heures de pointe du matin, et tous les travailleurs déclarent pouvoir utiliser l'un des deux modes génériques de transport : soit un véhicule particulier en tant que conducteur ou passager, soit les transports en commun.

Nous remarquons que près des trois quarts (73.3%) des individus sont âgés entre 30 et 50 ans. 85% des travailleurs ont un revenu de leur ménage inférieur ou égal à 300000 francs français (environ 45735€). Lorsque nous précisons cette distribution des revenus conditionnellement aux âges des membres actifs des ménages, les travailleurs les plus jeunes ont une distribution de leurs revenus décentrée vers les basses valeurs, et les travailleurs les plus vieux une distribution décentrée vers les hautes valeurs des classes de revenus. Cette variable de revenu est primordiale dans la description des choix de transport d'un individu car elle conditionnent les choix de localisation des ménages, les choix des niveaux de capital automobile, et les choix des modes de transport.

²Ceci nous assure de la stabilité des ressources budgétaires de l'individu sur la période d'étude.

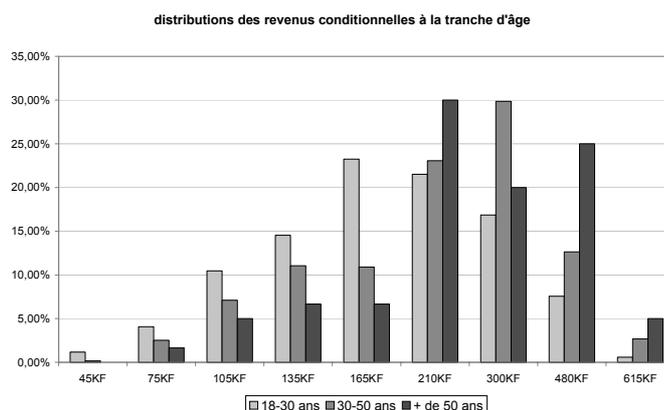


FIG. 4-2 – Distribution des revenus brut annuels conditionnellement à la tranche d'âge du travailleur.

Dans la mesure où les choix de localisation et le niveau de capital automobile causent eux-mêmes le choix du mode de transport, nous devons être prudent sur l'existence d'effets indirects liés à ces choix que nous supposons prédéterminés dans notre étude. A ce titre, nous présentons la distribution des types de trajet origine-destination pour le déplacement domicile-travail. Les trajets de banlieue à banlieue sont les plus représentés.

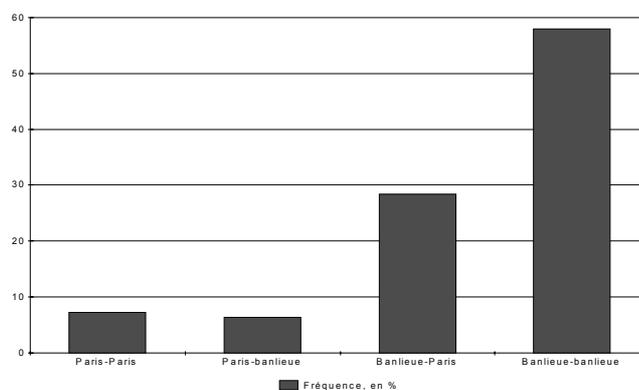


FIG. 4-3 – Types de corridors origine-destination pour le déplacement domicile-travail.

55.4% des individus déclare la possession d'un véhicule motorisé (principalement voiture) par leur ménage, et 38.15% en déclare deux. Nous pensons qu'il existe pour les ménages ne possédant qu'un véhicule motorisé pour plusieurs conducteurs une

contrainte collective d'allocation du capital privé motorisé de mobilité. Lorsque nous nous intéressons à la distribution du nombre de véhicules par actif dans le ménage de l'individus, nous observons que pour la quasi totalité des ménages, le capital de mobilité privé doit être partagé entre plusieurs membres. Le degré d'indépendance de l'individu dans l'organisation de son voyage en tant que conducteur peut être affecté par un ensemble de décisions prises au niveau de son ménage, contradictoires avec ses souhaits individuels, et peut l'inciter à augmenter son niveau de capital automobile ou le contraindre à se reporter sur les transports en commun. Pour notre application, cette variable est simplement descriptive. Nous supposons que le niveau du capital automobile du ménage est prédéterminé de façon optimale.

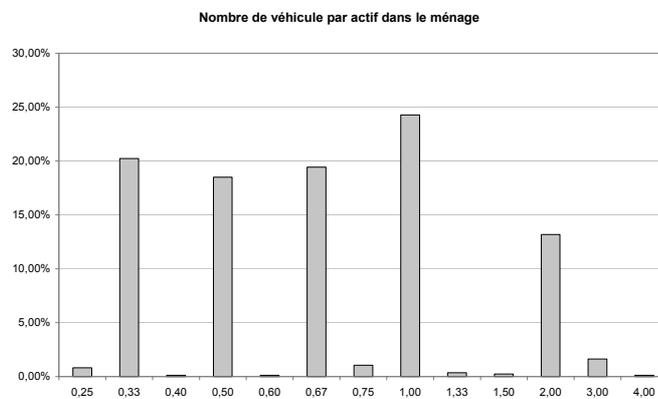


FIG. 4-4 – Nombre de véhicules par actif dans le ménage.

Les problèmes de congestion routière en milieu urbain implique un désagrément plus important pour le conducteur dans l'organisation de son déplacement, car la perte de ressources en temps grandit plus que proportionnellement avec la congestion sur trajet à effectuer. La congestion routière implique un accroissement plus que proportionnel à la longueur de la durée de trajet, et cause un décalage entre dynamique horaire des activités programmée et dynamique horaire effective : le non respect de certains horaires engendre un coût supplémentaire perçu ou effectif pour le conducteur. Relativement à la distribution horaire de la congestion, les individus ne font pas face au mêmes conditions de transport selon leur horaire de travail et l'horaire de leur déplacement correspondant. Nous rappelons que nous supposons pour notre application que l'horaire du déplacement est prédéterminé. Pour notre échantillon, 51.56% des individus commencent leur travail entre 08H00 et 09H00.

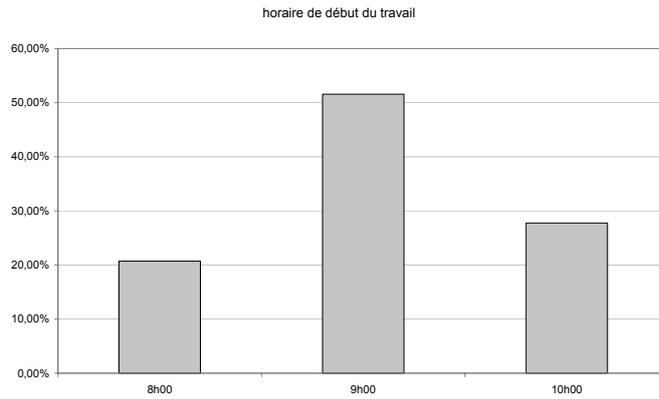


FIG. 4-5 – Répartition des horaires de début de l’activité travail.

4.2 Spécifications économétriques : discussion.

Nous développons plusieurs type de modèles de choix discrets afin de décrire le comportement de choix du moyen de transport pour un individu dans le cadre de déplacements réguliers domicile-travail. Nous nous plaçons dans le cadre théorique de l’utilité aléatoire, et répondons à plusieurs problèmes émergeant lors de la modélisation du comportement du voyageur : les problèmes d’hétéroscédasticité des alternatives de choix, de perception des attributs de transport, et d’hétérogénéité inobservée des goûts de l’individu. Nous déduisons des valeurs du temps propres à chaque individu, dépendant de leurs goûts, de leurs perceptions des attributs des marchés des alternatives et de leurs ressources budgétaires. Nos estimations obtenues en exploitant un échantillon de voyageurs vivant et travaillant dans la région Parisienne française fournissent des résultats conformes à l’intuition concernant le comportement de choix de l’individu et des valeurs du temps conformes aux valeurs exploitées dans les modèles agrégés de prévisions des flux de voyageurs sur les réseaux franciliens.

Lorsque nous cherchons à modéliser le comportement de choix d’un travailleur n appartenant à une population \mathcal{P} , nous devons être attentifs aux formes fonctionnelles utilisées, à la fois dans la spécification de la distribution du vecteur des perturbations, mais aussi dans la spécification des variables explicatives, précisément dans la forme qu’elles prennent lorsqu’elles sont incluses dans la fonction d’utilité de l’individu. Pour tous les modèles que nous estimons, nous admettons une structure additive de la fonction d’utilité en des paramètres de goûts caractérisant l’importance qu’accorde le voyageur aux variables expliquant le niveau d’utilité qu’il retire de ses choix. Ces

dernières peuvent entrer sous leur forme naturelle, mais aussi sous forme composite ou à travers une transformation.

Nous notons $X_{n,m}$ les variables propres à chaque alternative de transport : le nombre de connections pour le mode transport en commun, le nombre de véhicule par actif pour le mode voiture,... Le coût du déplacement en véhicule particulier p_T est calculé au moyen d'un coût kilométrique fournit par le Syndicat des Transports d'Ile-de-France (STIF) incluant la consommation d'essence et l'usure du véhicule, défini selon la méthode présentée dans le rapport INSEE(2000). Le calcul du coût du trajet en transport en commun repose sur la possession ou non d'un titre de transport : si c'est le cas, 2 trajets par jours ouvrés sont admis ; sinon le prix du billet à l'unité est utilisé. Les temps de trajet t_T sont calculés selon le principe de Wardrop(1952) sur le réseau routier et au chemin le plus court sur le réseau des transports en commun.

Les caractéristiques qui sont propres à l'individu, à la source de ses préférences, interviennent dans la fonction d'utilité représentant le niveau de satisfaction de l'individu : il peut s'agir de caractéristiques démographiques, géographiques, socio-économiques, calendaires,...et nous les notons Z_n . Le revenu journalier de l'individu n est calculé à partir du revenu total brut annuel du ménage avant impôt, net des cotisations sociales. Il est défini comme le revenu moyen par jour (sur une base comptable de 360 jours par an) et par individu actif dans le ménage.

Nous avons aussi souligné que les variables pouvait ne pas être nécessairement spécifiées sous leur forme linéaire, caractérisant ainsi certains effets comportementaux que nous souhaitons voir adopter l'individu. Néanmoins, prédéterminer le comportement de l'individu peut conduire à ne pas représenter fidèlement sa prise de décision. Le recours à la transformation de Box et Cox(1964), cas particulier de la transformation de Tukey(1957) est une solution adaptée à l'analyse des filtres de perception de l'individu. Nous renvoyons le lecteur aux travaux fondateurs de Gaudry(1978), et les applications de Mandel, Rothengater et Gaudry(1996). Par construction, cette transformation ne s'applique qu'aux variables à valeurs strictement positives, et se définit telle que

$$\forall x > 0, y = \begin{cases} \frac{x^\lambda - 1}{\lambda} & \text{si } \lambda \neq 0 \\ \ln(x) & \text{si } \lambda = 0 \end{cases} \quad (4.1)$$

est la transformée de Box-Cox. Le graphique ci-dessous expose quelques filtres pos-

sible, le cas $\lambda = 1$ signifiant qu'il n'y a aucune déformation de la mesure réelle, est représenté par la droite. Lorsque $\lambda < 1$, nous caractérisons une diminution de la mesure réelle (courbe concave), et lorsque $\lambda > 1$, c'est une amplification que nous observons (courbe convexe).

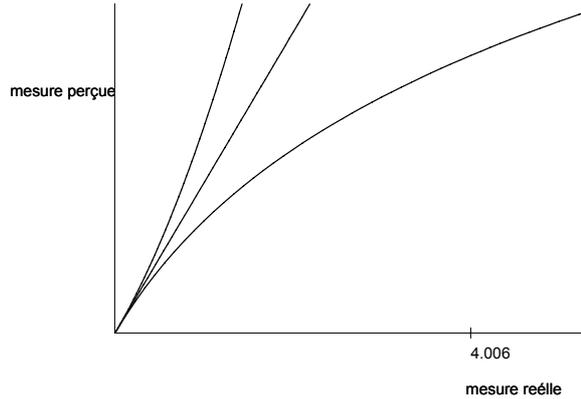


FIG. 4-6 – Transformation de Box-Cox.

Nous reprenons nos hypothèses développés dans les deux chapitres précédents pour spécifier une forme paramétrique de notre modèle. Nous reprenons le contexte théorique présenté pour l'analyse du choix du mode de transport et nous supposons toutes les conditions de stabilité satisfaites. L'hypothèse de séparation des préférences permet de réduire l'utilité indirecte du consommateur à sa composante associée au motif travail. Dans notre cadre d'analyse, les paramètres sont interprétés en supposant que les effets induit sur la demande de mobilité au cours de la journée de l'individu ne concerne pas celle associée à son activité travail : nous raisonnons à demande de mobilité donnée pour le déplacement domicile-travail, et nous supposons que modification de l'offre de transport pour ce motif affecte les demandes de mobilité associées aux autres activités de l'individu. En reprenant le cadre statistique développé dans le chapitre précédent, nous supposons que la forme générique de la fonction d'utilité aléatoire est donnée pour tout individu $n \in \mathcal{P}$ et pour chaque alternative $m \in \{1, 2\}$ par

$$W_{nm} = A_m + \alpha_n \frac{p_{T,n,m}^\lambda - 1}{\lambda} + \sum_{d=1}^D \beta_{n,d} \frac{t_{T,n,m,d}^{\mu_d} - 1}{\mu_d} + X'_{nm} \delta_{nm} + Z'_n \theta_{nm} + \sigma_m \varepsilon_{nm}, \quad (4.2)$$

où $\pi_n \equiv \{A_1, \dots, A_M, \alpha_n, \beta_{n,1}, \dots, \beta_{n,D}, \delta_{n1}, \delta_{n2}, \theta_{n1}, \theta_{n2}\}$ sont les paramètres des goûts de l'individu ; $\gamma \equiv \{\lambda, \mu_1, \dots, \mu_D\}$ sont ses filtres de perception. En principe, ces derniers sont propres à l'individu. Nous supposons que tous les travailleurs ont la même façon de percevoir les attributs prix et temps du marché des modes de transport. Il n'existe pas d'hétérogénéité inobservée concernant les perceptions des individus. L'interprétation de ces paramètres est générique. Ils représentent une façon générale d'entrevoir les attributs temporels et budgétaires du transport en tant que travailleur. σ_1, σ_2 sont des paramètres d'échelle caractérisant la dispersion des parts inobservables des niveaux d'utilité.

ε_n est une composante aléatoire de la fonction d'utilité, indépendante des variables observables. $\forall n \in \mathcal{P}, \forall m \in \mathcal{M}, \varepsilon_{nm} \rightarrow F(\varepsilon_{nm}) = \exp(-\exp(-\varepsilon_{nm}))$, loi extrême de type I ou loi de Gumbel, cas particulier de la famille des lois extrêmes généralisées définie par McFadden(1978), et $\varepsilon_n \rightarrow \mathcal{N}(0, \Sigma_{(2 \times 2)})$ sont les deux distributions que nous envisageons pour la spécification de nos modèles. La première conduit à la famille des modèles Logit, et la seconde à celle des modèles Probit.

Pour tous les individus de la population, quels que soient leurs choix, lorsque nous imposons $\forall n \in \mathcal{P}, \forall m \in \mathcal{M}, \pi_n = \pi$, nous admettons l'existence d'un vecteur de poids représentatifs pour la population. L'hétérogénéité inobservée des goûts n'est pas considérée explicitement. Elle peut être à la source de corrélations inobservables entre les possibilités de choix. Cette approche sera testée en supposant que la distribution sous-jacente des goûts au travers de la population échantillonnée est une loi normale multivariée dont la matrice de variance-covariance est diagonale, et présente des caractéristiques d'hétéroscédasticité concernant les dispersions des paramètres de goûts. Nous utilisons pour notre application la décomposition

$$\pi_{n(P,1)} = \pi + \begin{bmatrix} \omega_1 & \cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & \omega_P \end{bmatrix} \eta_n, \quad (4.3)$$

où la perturbation η_n suit une loi normale multivariée centrée réduite, $\eta_n \rightarrow \mathcal{N}(0, \mathbf{I}_P)$, et où $\omega_1, \dots, \omega_P$ sont les écarts-types associés aux distributions des paramètres de goûts. Nous renvoyons le lecteur aux travaux de Train et McFadden(2000), Train(1997, 1998, 2003), Brownstone et Train(1999) pour un exposé plus détaillé des spécifications paramétriques envisageables de la distribution des goûts au travers de la population. La partie aléatoire de la fonction d'utilité est composée de plusieurs dis-

tribution de probabilité, l'une propre aux goûts de l'individu et l'autre regroupant de façon générale l'ensemble des facteurs inobservables. Ces modèles de choix discrets à lois mixtes possèdent un avantage certain : dans le cadre d'une spécification Logit, ils permettent d'assurer l'existence de corrélations inobservables identifiables entre les alternatives provenant de la dispersion des goûts et des effets de substitution entre attributs observables.

Typologie des modèles ajustés				
Modèles	loi des perturbations	loi des paramètres	hétéroscédasticité	Transformations de Box-Cox
Logit	iid extrême type 1	aucune	non	non
Logit hétéroscédastique	iid extrême type 1	aucune	oui	non
Logit à lois mixtes	iid extrême type 1	normale	non	non
Box-Cox Logit	iid extrême type 1	aucune	non	oui
Probit	normale	aucune	oui	non

TAB. 4.1 – Types de spécifications économétriques utilisées pour l'application.

Les modèles Logit font appel à la loi extrême de type 1 et à une hypothèse d'indépendance entre les perturbations. En dehors de la spécification hétéroscédastique, nous supposons pour tous les autres modèles de cette famille $\sigma_1 = \sigma_2$. $\forall m \in \mathcal{M}$, $\sigma_m = \sigma$ impose le même goût pour la diversité quel que soit le choix m . Dans le cas contraire, il y a hétéroscédasticité du goût pour la diversité. Lorsque les sources d'inobservabilité sont différenciées selon les alternatives de l'ensemble de choix, nous supposons l'existence de facteurs propres à chacune d'entre elles inobservables. Dans la mesure où notre ensemble de choix est construit par l'agrégation de plusieurs modes de transport, les modes génériques obtenus ont des caractéristiques intrinsèques dont la diversité n'est vraisemblablement pas la même. Cette approche sera testée dans le cadre du modèle Logit hétéroscédastique totalement linéaire. Lorsque le vecteur des transformations de Box-Cox est composé de 1, $\bar{\gamma} = \{1, 1, \dots, 1\}$, les spécifications économétriques sont linéaires en les variables prix et temps. Les modèles qui ne considèrent pas ces transformations sont tous linéaires pour notre application.

Pour les spécifications Probit, la loi normale est générique : $\Sigma_{(2 \times 2)}$ est une matrice de variance-covariance symétrique définie positive. Nous ne portons aucune hypothèse sur l'indépendance des perturbations. Nous rappelons³ que les probabilités de choix sont définies par la différences des niveaux d'utilité aléatoires. Une

³Voir le chapitre précédent.

conséquence est, dans le cas de notre ensemble de choix dichotomique, l'impossibilité d'identifier les paramètres de $\Sigma_{(2 \times 2)}$. Il n'est pas possible de tester différentes hypothèses sur sa forme.

Les modèles Logit et Probit linéaires sont obtenus lorsque $\forall n \in \mathcal{P}, \forall m \in \mathcal{M}, \gamma = \bar{\gamma}, \pi_n = \pi$, et $\varepsilon_{nm} \rightarrow F(\varepsilon_{nm}) = \exp(-\exp(-\varepsilon_{nm}))$ ou $\varepsilon_n \rightarrow \mathcal{N}(0, \Sigma_{(2 \times 2)})$: il n'y a aucune transformation de Box-Cox, ni hétérogénéité des goûts. Le modèle Box-Cox Logit propose un relâchement des contraintes portées sur γ , et endogénéise les mécanismes de perception des individus sur les attributs de transport.

Les résultats des ajustements de nos 5 modèles sont présentés en annexe de ce chapitre. Tous les modèles sont estimés par la méthode du maximum de vraisemblance à information complète (voir par exemple Maddala(1983) pour les modèles standards et Newey et McFadden(1993) pour les propriétés théoriques de l'estimateur), en recourant ou non à l'inférence simulée (voir par exemple Hajivassiliou et Ruud(1994) pour une présentation des méthodes d'estimation par simulation pour les modèles à variables endogènes qualitatives), et les statistiques de Student sont calculés à partir des écart-type robustes à l'hétéroscédasticité arbitraire. Le logiciel TRIO[©] (Liem et Gaudry(1987)) est utilisé pour l'estimation du modèle Box-Cox Logit, et les logiciels SAS[©] V.8.02 et GAUSS[©] pour les autres modèles⁴. La procédure MDC[©] est utilisée pour les modèles Logit et Probit. Le modèle à lois mixtes recourt à la simulation par méthodes de Monte-Carlo pour l'estimation des paramètres. En accord avec les résultats de Bhat(2000), nous préférons l'usage de séquences de Halton pour la génération des nombres uniformes nécessaires à l'échantillonnage des distributions des paramètres de goûts. 500 répliquions par individu sont utilisés pour l'approximation des probabilités de choix.

4.3 Résultats et commentaires.

En accord avec les stratégies d'identification des paramètres exposées dans le chapitre précédent, nous choisissons le mode des transports en commun pour référence dans l'interprétation des paramètres estimables π_n de l'espérance d'utilité. Puisque seuls les différences entre les niveaux d'utilité comptent, la constante et

⁴Les procédures de Train(2003) sont utilisées, ainsi que d'autres procédures programmées de façon ad hoc. Le travail purement informatique associé à l'estimation de tous les modèles n'est pas présenté dans cette thèse. L'ensemble des procédures que j'ai développées sont accessibles sur simple demande.

les paramètres des variables propres à l'individu sont les différences entre les paramètres du mode véhicule particulier avec ceux du mode des transports en commun. Aussi, il est important de souligner que ces paramètres π_n ne sont estimables que relativement aux paramètres de variance-covariance des perturbations du modèle : ceux-ci ne peuvent être isolés dans le processus d'estimation. Seuls les signes des coefficients et leurs contributions statistiques à l'explication du comportement de choix sont interprétable.

Comme nous modélisons des probabilités de choix sur un ensemble à deux modalités, nous modélisons ici la probabilité de choisir un véhicule particulier, c'est-à-dire la probabilité que l'utilité de l'individu associée à ce mode soit supérieure à son niveau d'utilité pour l'autre mode. Nous mesurons l'impact de certaines variables explicatives sur ce choix, celui des transports en commun étant l'événement complémentaire. Le modèle Box-Cox Logit n'est pas estimé avec le même ensemble de variables explicatives. Des problèmes liés à la stabilité du point de convergence avec l'ensemble des variables explicatives des modèles linéaires nous ont conduit à simplifier la spécification. Les résultats restent en accord avec les intuitions et arguments théoriques de notre approche.

Le profil de l'individu de référence dans l'échantillon est un homme qui réside et travaille à Paris, dont l'âge est compris entre 30 ans et 55 ans, et qui débute son travail entre 07H00 et 08H00 le matin. Son ménage dispose d'au moins un véhicule particulier par actif.

4.3.1 Interprétations.

Toutes les variables ne sont pas significatives, mais certains résultats ressortent de façon robuste quelle que soit la spécification du modèle. Les effets totaux d'une augmentation du coût ou du temps de transport sur le niveau d'utilité sont négatifs : l'utilité est une fonction décroissante des temps et coûts de transport. Toutes choses égales par ailleurs, une augmentation du temps de transport en mode véhicule particulier ou une diminution du temps de transport en mode transports en commun diminuent le différentiel des niveaux d'utilité que fournissent ces deux modes : la probabilité de choisir le mode véhicule particulier diminue. De façon analogue, toutes choses égales par ailleurs, une augmentation du coût du transport en mode véhicule particulier ou une diminution du coût du transport en mode transports en commun diminuent le différentiel des niveaux d'utilité que fournissent ces deux modes :

la probabilité de choisir le mode véhicule particulier diminue. L'augmentation du temps de parcours par un mode a un effet négatif sur la probabilité de le choisir. Inversement, si l'alternative non choisie voit ses conditions d'offre se dégrader, alors l'individu confirmera ses préférences dans le choix pour le mode qu'il exploite lors de son déplacement. Par exemple, prenons le mode voiture, et considérons le réseau routier : si ses capacités d'absorption sont accrues, le niveau de congestion doit diminuer pendant les heures de pointe et les temps et coûts de trajet diminuent aussi. La probabilité de choisir ce mode va alors s'accroître. De même, une augmentation des fréquences de passage des transports en commun à leurs points d'embarquement des passagers conduit à une diminution des temps d'attente et donc à un accroissement de la probabilité de les choisir, toutes choses égales par ailleurs. Les variables prix et temps sont significatives quel que soit le modèle estimé. Les tests de Student rejettent l'hypothèse de base de la nullité des coefficients associés aux variables prix et temps.

Le revenu est une variable expliquant le choix du mode de transport. Son effet s'étend au delà de cette problématique. En particulier, le niveau de revenu du ménage est un déterminant de ses choix de localisation et de capital automobile, qui causent eux-mêmes les choix de déplacement (modes, itinéraires et horaires des déplacements) associé à une demande de mobilité. L'effet total du revenu sur le choix du mode de transport est composé d'effets directs et d'effets indirects résultant des choix concernant les autres facteurs de la demande de transport : il est à distinguer selon les localisations du domicile et du travail de l'individu, mais aussi selon le niveau de son capital automobile. Pour la variable revenu, nous estimons la différence des effets totaux entre le mode de transport voiture et le mode transports en commun. Nous ne pouvons pas identifier les signes distincts des effets totaux pour chacun des modes de transport. La spécification linéaire du modèle en cette variable permet d'estimer seulement l'amplitude de la différence entre les effets totaux associés à chacun des modes. Nous rappelons qu'à demande de mobilité donnée pour le motif domicile-travail, l'effet total d'une augmentation du revenu est positif quel que soit le mode de transport choisi : il augmente le pouvoir d'achat de l'individu.

Toutes choses égales par ailleurs, une augmentation du revenu a un effet total positif plus important dans le mode des transports en commun que dans le mode véhicule particulier pour notre individu de référence. A Paris intra-muros, la densité du maillage du réseau des transports en commun et l'accessibilité à de nombreux points d'entrées et de sorties offrent une variété d'itinéraires qui permettent de se

déplacer facilement dans la ville en échappant à la congestion routière. De façon plus générale, la forte desserte en transports en commun à l'intérieur de Paris, la congestion routière inhérente aux faibles capacités de circulation, les problèmes et les coûts liés au stationnement rendent le mode automobile moins attractif à son utilisation pour tous les motifs de déplacements au sein de la ville.

Les variables croisées du revenu journalier avec le type de trajet origine-destination mesure l'impact du choix de la localisation de la résidence relativement au lieu du travail de son individu sur l'effet du revenu dans le choix du mode de transport. Lorsque le travailleur résidant à Paris doit se déplacer en banlieue, nous constatons que le signe de la différence des effets totaux change : une augmentation du revenu journalier de l'individu a un effet total plus important sur l'utilité qu'il retire du choix d'un véhicule particulier que sur l'utilité du choix des transports en commun. Lorsque l'individu réside en banlieue, peu importe le lieu de son travail, l'augmentation du revenu augmente la probabilité d'utiliser le mode voiture pour le déplacement domicile-travail : l'effet total est plus important pour ce mode que pour celui des transports en commun. L'effet se différencie selon la destination du résident en banlieue. Lorsque son lieu de travail est situé à Paris, la différence des effets totaux entre les deux modes de transport diminue relativement à la différence de ces deux effets lorsque la destination est située en banlieue. Un premier argument à ce résultat est à nouveau la structure étoilée du réseau des transports en commun avec en son centre la ville de Paris, alors plus accessible par ce mode à partir de la banlieue. Nous pensons aussi que la présence d'une forte congestion aux niveau des goulots d'étranglement situés aux points d'entrée de la ville de Paris affecte l'effet de l'augmentation du revenu pour le mode voiture par une augmentation des coûts liés à la congestion. Nous relativisons ce dernier effet dans la mesure où de nombreux déplacements de banlieue à banlieue transite par la ville de Paris. C'est surtout l'accroissement de l'accessibilité à destination par les transports en commun qui joue sur la diminution du différentiel des effets du revenu dans chaque mode. D'une manière générale, en dehors de déplacements domicile-travail Paris-Paris, l'augmentation du revenu journalier de l'individu favorise l'utilisation d'un véhicule particulier : les transports en commun restent moins attractifs.

Lorsque nous considérons la présence d'une contrainte d'utilisation du capital automobile du ménage pour le travailleur, la probabilité de choisir ce mode diminue toute choses égales par ailleurs : le signe de la variable "moins d'un véhicule par actif" est négatif pour tout les modèles estimés. La statistique de Student associée

rejette l'hypothèse de nullité du coefficient, impliquant une contribution significative sur le choix du mode de transport. L'ensemble des modèles suggèrent que le nombre de véhicules disponibles que les individus possédant le permis et vivant dans le même ménage ont à se partager a un impact positif sur la probabilité de choisir ce mode. Plus le ménage possède de véhicule, moins la contrainte de partage entre ses membres est importante, et le travailleur utilise plus aisément ce mode pour son déplacement domicile-travail. D'après le signe négatif de la variable croisée du revenu journalier avec l'indicatrice de la présence d'une contrainte dans le partage du capital automobile, le fait de disposer de moins d'un véhicule par actif dans le ménage diminue l'amplitude de la différence entre les effets totaux d'un accroissement du revenu sur chaque mode de transport. L'effet d'une augmentation du revenu sur le choix d'un véhicule particulier est amoindri lorsque l'individu n'est pas sûr d'en disposer pour compte propre au sein de son ménage. Ce résultat est robuste à la spécification économétrique du modèle.

De façon absolue, l'impact du type du corridor origine-destination (Paris-Paris, Paris-banlieue, Banlieue-Paris, Banlieue-banlieue) sur le choix du mode de transport est dans le sens de l'intuition. La forte desserte en transports en commun dans la ville de Paris, facilement accessible par ce mode à partir de la banlieue, associée à la congestion routière aux portes de la ville (goulots d'étranglement), favorisent la probabilité d'utiliser les transports en commun à partir de la banlieue lorsque la destination est Paris. La probabilité d'utiliser un véhicule particulier diminue pour ces individus relativement à ceux dont la résidence est Paris, pour une même zone de destinations du lieu de travail. Lorsque le lieu de travail est situé en banlieue, la probabilité d'utiliser un véhicule particulier augmente. La perte d'intensité du maillage du réseaux des transports en commun à mesure que la destination s'éloigne de Paris diminue les facilités de déplacement par ce mode.

L'horaire du début du travail semble jouer un rôle sur le choix du mode de transport. L'étalement horaire et l'intensité de la congestion sur les réseaux routiers incite les travailleurs à se déplacer en transports en commun. Plus l'horaire de début du travail s'éloigne de la pointe de la congestion du matin, plus la probabilité de choisir un véhicule particulier pour son déplacement augmente. Le niveau de congestion n'est pas le même au cours des heures de pointe : l'individu n'éprouve pas les mêmes difficultés à circuler selon l'heure à laquelle il souhaite se déplacer.

D'autres résultats, plus généraux, sortent de façon régulière au travers de nos modèles. Les travailleurs les plus jeunes ont une probabilité d'utiliser une véhicule

particulier plus faible, par la corrélation positive entre revenu et âge. Les femmes ont une probabilité de choisir un véhicule particulier plus faible.

Dans les modèles où les variables coûts et durées entrent sous une forme linéaire, les amplitudes des effets totaux de leurs variations marginales sont constantes quels qu'en soient les niveaux initiaux. Avec les transformations de Box-Cox, les effets totaux des différences de temps et de coûts de transport dépendent des niveaux initiaux des allocations budgétaires et temporelles au déplacement domicile-travail. Le modèle avec transformations de Box-Cox sur les variables coût et temps de trajet proposent plusieurs résultats importants. Le coût ressenti en temps est une fonction de coût linéaire. Le coût de transport est une fonction de coût concave. Pour notre modèle ajusté, la perte d'utilité liée à une variation marginale de la durée de transport est constante quel que soit le niveau initial de l'allocation, et la perte d'utilité liée à une variation marginale du coût de transport augmente moins que proportionnellement avec le niveau initial de l'allocation. Nous rappelons que l'effet total d'une variation du temps de trajet est la somme d'un effet à niveau de mobilité constant et d'un effet induit par l'ajustement de la demande de mobilité aux nouvelles conditions technologiques du marché des transports. La valeur du paramètre de Box-Cox associé à la variable temps de trajet signifie que l'effet total suite à l'augmentation du temps de trajet est négatif mais reste constant avec le montant de l'allocation temporelle. La valeur du paramètre de Box-Cox associé à la variable coût du trajet signifie que l'effet total suite à l'augmentation du temps de trajet est négatif et est une fonction décroissante du montant de l'allocation budgétaire. Le test de Student d'unité du paramètre de la transformation du temps de transport ne rejette pas cette à l'hypothèse de base au seuil de 5% : le temps du trajet intervient de façon linéaire dans l'utilité.

Le modèle Logit hétéroscédastique fait apparaître une différence entre les variances des perturbations associées à chacun des modes de transport. Cependant, la statistique de Student calculée sous l'hypothèse nulle d'égalité des variance est égale à -0.3385 , en dehors de la région de rejet à un seuil de risque de 10%. Le modèle conclue à une variance du mode transports en commun non différente que celle du mode véhicule particulier. Les estimations de nos modèles à lois mixtes rejettent l'existence d'hétéroscédasticité dans les paramètres de goûts pour le prix et le temps du trajet. Les poids qu'occupent ces variables dans la différence des niveaux d'utilité restent stables au travers de la population échantillonnée.

4.3.2 Analyse des valeurs du temps.

Nous déduisons l'expression de la valeur du temps en calculant explicitement le taux marginal de substitution entre temps de trajet et revenu net des frais de transport. Il exprime le prix qu'est prêt à payer l'individu pour épargner la dernière unité de temps de trajet allouée et conserver le même niveau d'utilité :

$$\forall m \in \mathcal{M}, VOT_{nm}(t_{nm}, p_{nm}) = \frac{\beta_n}{\alpha_n} t_{nm}^{\mu-1} p_{nm}^{1-\lambda}. \quad (4.4)$$

Par construction, nous remarquons qu'il s'agit d'une expression faisant intervenir les (dé)goûts de l'individu, sa façon de percevoir les quantités temporelles et budgétaires allouées, et les niveaux effectifs des allocations de temps et budget. Par définition d'un prix implicite, nous souhaitons assurer une valeur positive pour le taux marginal de substitution temps-prix. Ceci implique pour nos paramètres qu'ils soient de même signe, en particulier :

$$\alpha_n < 0, \beta_n \leq 0. \quad (4.5)$$

Nous notons que les présences des niveaux d'allocation prix et temps sont conditionnelles aux valeurs des paramètres des filtres de perception, c'est-à-dire les transformations de Box-Cox. Nous pouvons étudier plus rigoureusement les propriétés de la valeur du temps de transport : comment réagit-elle avec les niveaux des attributs modaux temps et prix ? En évaluant les dérivées premières et secondes par rapport à celles-ci, nous obtenons $\forall m \in \mathcal{M}$, pour la variable temps,

$$\begin{aligned} \frac{\partial VOT_{nm}}{\partial t_{nm}}(\overline{t_{nm}}, \overline{p_{nm}}) &= \\ (\mu - 1) \frac{\beta_n}{\alpha_n} \overline{t_{nm}}^{\mu-2} \overline{p_{nm}}^{1-\lambda}, \end{aligned} \quad (4.6)$$

et

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 VOT_{nm}}{\partial t_{nm}^2}(\overline{t_{nm}}, \overline{R_n - p_{nm}}) &= \\ (\mu - 2)(\mu - 1) \frac{\beta_n}{\alpha_n} \overline{t_{nm}}^{\mu-3} \overline{p_{nm}}^{1-\lambda}. \end{aligned} \quad (4.7)$$

La valeur du temps de transport décroît avec la durée de celui-ci si l'individu la perçoit moins que proportionnellement à son niveau effectif, c'est-à-dire lorsque $\mu < 1$. C'est une fonction croissante avec la durée de transport si le coût perçu du temps est une fonction convexe, c'est-à-dire si $\mu > 1$. La propension à payer pour l'épargne de temps de transport est invariante avec la durée de transport lorsque $\mu = 1$: il

n'y a aucun effet de distorsion de la mesure du temps. L'amplitude de la variation de la valeur du temps avec la durée de transport dépend de la valeur de μ . Lorsque $\mu \notin [1, 2]$, l'amplitude de la variation de la propension à payer pour l'épargne de temps de transport croît plus que proportionnellement avec la durée du trajet. $\mu < 1$ signifie que l'individu est prêt à payer de moins en moins à mesure que la durée augmente, et l'amplitude de cette diminution est de moins en moins importante avec l'augmentation. $\mu > 2$ signifie que l'individu est prêt à payer de plus en plus pour épargner du temps de transport et de façon plus que proportionnelle au niveau de l'augmentation. $\mu \in [1, 2]$ signifie que l'individu est prêt à payer de plus en plus pour épargner du temps de transport et de façon moins que proportionnelle au niveau de l'augmentation.

Pour la variable coût du transport, nous obtenons

$$\begin{aligned} \frac{\partial VOT_{nm}}{\partial p_{nm}} (\overline{t_{nm}}, \overline{R_n - p_{nm}}) = \\ (1 - \lambda) \frac{\beta_n}{\alpha_n} \overline{t_{nm}}^{\mu-1} \overline{p_{nm}}^{-\lambda}, \end{aligned} \quad (4.8)$$

et

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 VOT_{nm}}{\partial p_{nm}^2} (\overline{t_{nm}}, \overline{p_{nm}}) = \\ -\lambda (1 - \lambda) \frac{\beta_n}{\alpha_n} \overline{t_{nm}}^{\mu-1} \overline{p_{nm}}^{-\lambda-1}. \end{aligned} \quad (4.9)$$

$\lambda < 1$ implique l'existence d'un effet prix positif dans la fonction valeur du temps. Dans ce cas, la propension à payer pour l'épargne de temps de transport augmente avec le niveau du prix. $\lambda < 1$ implique aussi une amplitude de l'augmentation de la variation de la propension à payer pour l'épargne de temps moins que proportionnelle à la variation du niveau initial du coût. $\lambda > 1$ signifie que l'individu est prêt à payer de moins en moins pour épargner du temps de transport lorsque son coût augmente. $\lambda > 1$ signifie aussi que l'amplitude de l'augmentation de la valeur du temps est plus que proportionnelle avec l'augmentation du coût. L'effet croisé entre temps et prix de trajet et est défini par

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 VOT_{nm}}{\partial t_{nm} \partial p_{nm}} (\overline{t_{nm}}, \overline{p_{nm}}) = \\ (\mu - 1) (1 - \lambda) \frac{\beta_n}{\alpha_n} \overline{t_{nm}}^{\mu-2} \overline{p_{nm}}^{-\lambda}. \end{aligned} \quad (4.10)$$

Nous remarquons que les propriétés de la fonction VOT dépendent de la façon dont les niveaux des prix et temps sont perçus par le voyageur. Nous dénombrons

neuf profils distincts du comportement de dépense monétaire pour l'épargne de temps de transport, définis selon les valeurs des paramètres des filtres de perception. Le tableau ci-après les synthétise.

Valeurs des transformations	Augmentation du prix du trajet	Augmentation du temps du trajet	Effet croisé prix-temps
$\lambda > 1, \mu > 1$	-	+	-
$\lambda > 1, \mu = 1$	-	0	0
$\lambda > 1, \mu < 1$	-	-	+
$\lambda = 1, \mu > 1$	0	0	0
$\lambda = 1, \mu = 1$	0	0	0
$\lambda = 1, \mu < 1$	0	0	0
$\lambda < 1, \mu > 1$	+	-	+
$\lambda < 1, \mu = 1$	+	-	0
$\lambda < 1, \mu < 1$	+	-	-

TAB. 4.2 – Réponses de la fonction valeur du temps, modèle Box-Cox Logit

L'ajustement de nos modèles nous permet de pouvoir présenter une palette de valeurs du temps selon les hypothèses sous-jacentes à leurs spécifications. Le tableau ci-après présente les valeurs du temps calculées à partir des estimations des paramètres, des niveaux des durées et coûts des individus échantillonnés. Pour le modèle à lois mixtes, la fonction valeur du temps est simulée par rééchantillonnage de réalisations des perturbations des paramètres de goûts dans une loi normale centrée réduite : 10000 tirages sont effectués pour calculer la valeur du temps correspondante. Pour le modèle Logit avec transformation de Box-Cox, la valeur du temps est calculée pour le contrat de transport prix moyen-temps moyen de l'échantillon pour chaque mode.

Modèle	Valeur du temps en €/heure
Logit	10.45
Logit hétéroscédatique	10.48
Logit à lois mixtes	9.92
Box-Cox Logit	VP : 10.9467, TC : 35.4661
Probit	10.44

TAB. 4.3 – Valeurs horaires des temps de trajet, en euros, modèles ajustés.

Boiteux (2001) cite dans le rapport pour le Commissariat Général du Plan des valeurs horaires autour de 13.5e pour le temps de trajet sur le réseau. Notre temps total de trajet inclue aussi les temps de carroyage aux points d'entrées et sortie des réseaux, ainsi que les temps d'attente des modes de transport. Les travaux précédents de Fontan et de Palma (1999), de Lapparent (2003) sur la même base de données pour des spécifications économétriques des niveaux d'utilité incorporant une différenciation des temps de transport au sein d'un même mode en plusieurs composantes montrent que le voyageur tend à sous évaluer la durée allouée en dehors du mode de transport relativement à la durée allouée à l'intérieur du mode de transport. La propension à payer pour l'épargne de temps de transport en dehors du mode est plus faible que celle à l'intérieur du mode de transport. Deux explications sont possibles : la possibilité d'endogénéiser plus aisément des activités complémentaires en dehors du mode de transport durant l'activité de transport, et le degré de contrôle de l'allocation en temps de transport. En dehors du mode, l'allocation superflue de ressources en temps est directement causée par l'individu. A l'intérieur du mode de transport, c'est à la fois par ce premier canal et par celui de la congestion sur les réseaux de transport qu'il subit indirectement cette perte. La présence de cette externalité négative amplifie la propension à payer pour épargner du temps de transport. Le fait que nos valeur du temps soient plus faibles tient compte, à temps de trajet constant, de la moindre importance qu'accorde le voyageur à celui-ci lorsqu'il peut être exploité à d'autre activités complémentaires. Les valeurs obtenues pour les modèles linéaires sont proches de celles énoncées dans le rapport TRACE (1997) concernant la demande de modes de transport en Ile-de-France pour le motif domicile-travail. Dans le modèle Box-Cox Logit, le fait que le prix intervienne de façon décroissante convexe dans l'utilité accroît la valeur du temps de transport pour le déplacement domicile-travail. Le résultat suggère une demande de capacité de circulation plus grande de la part des travailleurs pour ce motif pendant la période de congestion du matin.

Avec le modèle Logit à transformations de Box-Cox, la présence d'une fonction de coût concave en prix implique que l'individu est prêt à payer de moins en moins cher pour économiser une unité de temps de transport pour son déplacement domicile-travail, comme représenté dans le nuage de points ci-après.

Le fait que le coût de transport entre de façon décroissante convexe dans l'utilité du consommateur donne une interprétation intéressante sur la modification de son équilibre en termes de consommation, loisir et mobilité, tel que nous l'avons décrit

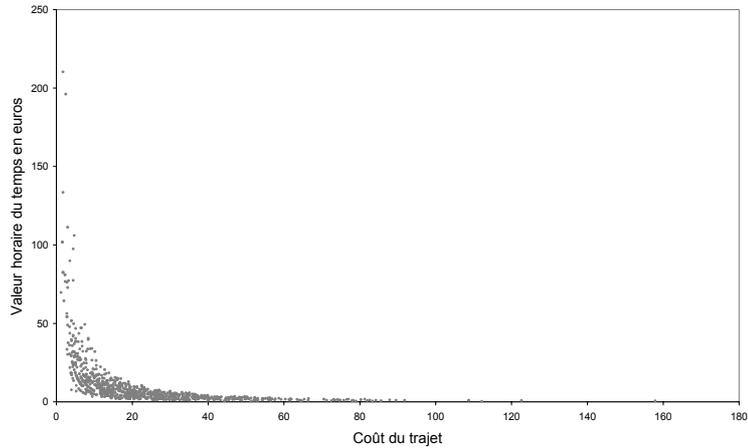


FIG. 4-7 – Paires "coût-valeur du temps" estimées

dans le second chapitre. Une augmentation du coût de transport pour le déplacement domicile-travail engendre à demande de mobilité constante une diminution de sa consommation et de son loisir. Nous supposons que les paramètres sont interprétés en supposant que les effets induit sur la demande de mobilité au cours de la journée de l'individu ne concerne pas celle associée à son activité travail : nous raisonnons à demande de mobilité donnée pour le déplacement domicile-travail, et nous supposons que modification de l'offre de transport pour ce motif affecte les demandes de mobilité associées aux autres activités de l'individu. L'augmentation du coût du trajet induit une diminution de la mobilité totale de l'individu, mais cette diminution de mobilité est de plus en plus petite à mesure que le coût des déplacements augmentent. La diminution de la demande totale de transport pour d'autres motifs que le trajet domicile-travail permet de rajuster les niveaux de consommation et loisir de l'individu à la hausse. L'effet total sur l'utilité est pour notre application négatif. Pour une situation initiale donnée, plus la variation du coût du trajet est conséquente, moins l'amplitude de l'effet total est importante, et le consentement de l'individu à payer pour compenser la perte d'utilité diminue. Si le prix du déplacement domicile-travail augmente, l'individu se déplace globalement moins mais cette diminution de mobilité étant décroissante avec ce prix, cela signifie que l'individu ne souhaite pas diminuer sa mobilité en deçà d'un certain seuil de subsistance.

La distribution de la valeur du temps sur l'échantillon observée est multimodale. En moyenne, en mode et en médiane, la valeur du temps est plus élevée dans

le mode transports en commun pour le déplacement domicile-travail. Les valeurs modales amplifient ce résultat. Toutes choses égales par ailleurs, le gain lié à la diminution du coût de transport pour les autres motifs suivant la diminution de leur demande de mobilité suite à l'augmentation du temps du trajet domicile-travail est plus grand pour l'utilisateur d'un véhicule particulier. Il est plus facile pour l'individu de réorganiser dans le temps et l'espace son calendrier d'activités lorsqu'il utilise un véhicule particulier. La distribution de la valeur du temps pour le mode transports en commun est moins concentrée (variance plus élevée), et peut s'expliquer par le fait que plusieurs modes de transport associés à plusieurs types de réseaux constituent ce mode générique.

Statistiques descriptives		
	Transp. Com.	Véh. Part
Moyenne	35.4661	10.9467
Médiane	27.4342	5.6859
Mode	22.2301	11.2847
Ecart-type	24.4887	17.5781
Kurtosis	6.0212	41.5804
Coefficient d'asymétrie	2.0182	5.3312
Plage	202.4793	210.0095
Minimum	5.8652	0.2669
Maximum	208.3444	210.2765
Taille de l'échantillon	865	

TAB. 4.4 – Statistiques descriptives des valeurs horaires du temps par mode de transport, en euros, modèle Box-Cox Logit

Conclusion.

Quel que soit le modèle utilisé, les variables prix et temps propres aux alternatives, et la variable revenu du ménage sont statistiquement significatives. Le niveau de capital privé de mobilité, et la structure en étoile du réseau de transports en commun avec Paris en son centre semble aussi jouer un rôle déterminant dans le choix du mode de transport. La grille de valeurs du temps que nous avons déduite de nos modèles est cohérente avec les valeurs tutélaires utilisée dans la pratique des

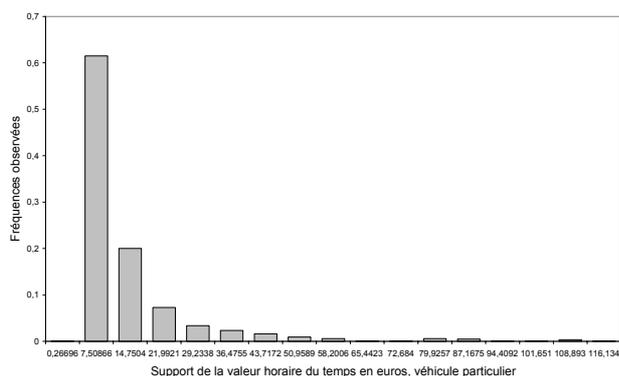


FIG. 4-8 – Distribution estimée de la valeur horaire du temps sur l'échantillon observé, modèle Box-Cox Logit, mode véhicule particulier.

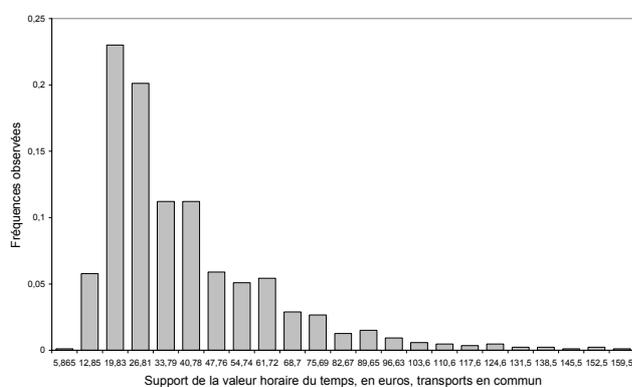


FIG. 4-9 – Distribution estimée de la valeur horaire du temps de transport, modèle Box-Cox Logit, mode transports en commun.

modèles agrégés de prévision des flux de trafic en région parisienne⁵. La spécification linéaire est la plus couramment utilisée. L'introduction de non linéarité dans l'utilité conduit à considérer le coût du temps convexe. Sa présence accroît la valeur du temps.

Plusieurs limites apparaissent dans notre démarche. Nous ne nous intéressons qu'au choix du mode de transport, pour un motif donné : nous devrions intégrer le choix de l'horaire et de l'itinéraire. Pour la région parisienne, Fontan et de Palma (2001) travaillent à l'introduction de fonction de coûts de déshorage, telles celles

⁵Rapports Trace(1997) et Boiteux(2001)

proposées par Vickrey (1969), où valeurs du temps d'arrivée en avance et temps d'arrivée en retard entrent de façon explicite dans l'utilité de l'individu afin d'étudier l'impact du choix horaire dans la demande de transport, et la dynamique des flux de voyageurs en résultant. Nous ne considérons pas l'organisation calendaire des activités de l'individu, ni les interactions avec les calendriers des activités des membres du ménage auquel il appartient, et ne focalisons que sur un déplacement domicile-travail. Le voyageur peut planifier d'autres activités pouvant et/ou devant être réalisées avant le travail. Le développement de modèles fondés sur des grilles d'activités est récent, tel le prototype proposé par Ben-Akiva et Bowman (1998) pour la région de Boston, et permet d'intégrer plusieurs dimensions de la demande de transport : choix des destinations et horaires de réalisation des activités, emboîtement des activités dans un calendrier et planification des déplacements associés, mesurant ainsi l'impact des autres déplacements sur l'un d'entre eux en particulier. Finalement, tel que Marshack (1960) l'a déjà souligné, nous devrions considérer l'existence d'incertitude dans l'environnement du décideur afin de mesurer l'impact du risque lié à l'allocation de ressources en temps dans les déplacements dû à la volatilité des temps de trajets.

Annexe : résultats des estimations.

Choix du mode de transport : probabilité de choisir un véhicule particulier		
Variables expliquée : choix observé (VP :51.45%, TC :48.45% sur l'échantillon)	Paramètres (écarts-type entre parenthèses)	
Variables explicatives	Logit	Probit
Constante	0.3811 (0.6419)	0.6912 (0.45104)
Temps du trajet	-0.0610 (0.0064)	-0.1106 (3.2899E-5)
Coût du trajet	-0.0534 (0.0080)	-9.6857E-2 (6.5797E-5)
Revenu journalier de l'individu	-0.00087 (0.00084)	-1.578E-3 (15.758E-7)
Revenu journalier de l'individu et déplacement Paris-banlieue	0.00202 (0.00132)	3.6639E-3 (28.49E-7)
Revenu journalier de l'individu et déplacement Banlieue-Paris	0.00251 (0.00107)	4.5526E-3 (20.331E-7)
Revenu journalier de l'individu et déplacement Banlieue-banlieue	0.00237 (0.00089)	4.2987E-3 (16.844E-7)
Revenu journalier de l'individu et nombre de véhicules par actif inférieur à 1	-0.00136 (0.00071)	-2.4668E-3 (12.765E-13)
Déplacement Paris-banlieue	1.3916 (0.7346)	2.5241 (0.68232)
Déplacement Banlieue-Paris	-0.4274 (0.7050)	-0.7752 (0.49842)
Déplacement Banlieue-banlieue	1.1739 (0.6012)	2.1292 (0.41584)
Nombre de véhicules par actif inférieur à 1	-0.6731 (0.3656)	-1.2209 (0.14015)
Age de l'individu est inférieur à 30 ans	-0.6356 (0.2333)	-1.1529 (6.448 1E-2)
Age de l'individu est supérieur à 50 ans	0.0687 (0.3663)	0.1246 (0.15002)
Le travailleur est une femme	-0.5140 (0.1998)	-0.9323 (4.3097E-2)
Le travailleur commence son travail entre 08H00 et 09H00	0.2153 (0.2377)	0.3905 (7.566 7E-2)
Le travailleur commence son travail entre 09H00 et 10H00	0.5067 (0.2942)	0.9191 (0.10100)
Statistiques descriptives		
Log-vraisemblance, constante seule	-599.55	-599.211
Log-vraisemblance au point de convergence	-335.1647	-336.8653
Taille de l'échantillon	865	
Nombre de paramètres	17	
Statistique du rapport de vraisemblance.	528.82	524.69

TAB. 4.5 – Table des estimations des modèles

Choix du mode de transport : probabilité de choisir un véhicule particulier	
Variables expliquée : choix observé (VP :51.45%, TC :48.45% sur l'échantillon) Paramètres (écarts-type entre parenthèses)	
Variables explicatives	Logit à lois mixtes
Constante	0.4110 (0.6585)
Temps du trajet, poids moyen	-0.0632 (0.0099)
Temps du trajet, écart-type du poids	0.0095 (0.0326)
Coût du trajet, poids moyen	-0.0590 (0.0111)
Coût du trajet, écart-type du poids	0.0205 (0.0142)
Revenu journalier de l'individu	-0.00081 (0.00087)
Revenu journalier de l'individu et déplacement Paris-banlieue	0.00212 (0.00135)
Revenu journalier de l'individu et déplacement Banlieue-Paris	0.00261 (0.00113)
Revenu journalier de l'individu et déplacement Banlieue-banlieue	0.00250 (0.00096)
Revenu journalier de l'individu et nombre de véhicules par actif inférieur à 1	-0.00153 (0.00081)
Déplacement Paris-banlieue	1.4417 (0.751)
Déplacement Banlieue-Paris	-0.4148 (0.7214)
Déplacement Banlieue-banlieue	1.2092 (0.6084)
Nombre de véhicules par actif inférieur à 1	-0.6573 (0.3841)
Age de l'individu est inférieur à 30 ans	-0.6577 (0.2466)
Age de l'individu est supérieur à 50 ans	0.0740 (0.3784)
Le travailleur est une femme	-0.5378 (0.2102)
Le travailleur commence son travail entre 08H00 et 09H00	0.2043 (0.25)
Le travailleur commence son travail entre 09H00 et 10H00	0.4911 (0.3046)
Statistiques descriptives	
Log-vraisemblance, constante seule	-599.55
Log-vraisemblance au point de convergence	-334.7616
Taille de l'échantillon	865
Nombre de paramètres	19
Statistique du rapport de vraisemblance.	529.62

TAB. 4.6 – Table des estimations des modèles (suite)

Choix du mode de transport : probabilité de choisir un véhicule particulier	
Variables expliquée : choix observé (VP :51.45%, TC :48.45% sur l'échantillon)	Paramètres (écarts-type entre parenthèses)
Variables explicatives	Logit hétéroscédastique
Constante	0.4040 (0.6795)
Temps du trajet	-0.0621 (0.0112)
Coût du trajet	-0.0542 (0.0136)
Revenu journalier de l'individu	-0.00083 (0.00089)
Revenu journalier de l'individu et déplacement Paris-banlieue	0.00213 (0.0015)
Revenu journalier de l'individu et déplacement Banlieue-Paris	0.00237 (0.0012)
Revenu journalier de l'individu et déplacement Banlieue-banlieue	0.00245 (0.0011)
Revenu journalier de l'individu et nombre de véhicules par actif inférieur à 1	-0.00147 (0.00086)
Déplacement Paris-banlieue	1.4523 (0.8463)
Déplacement Banlieue-Paris	-0.3205 (0.7418)
Déplacement Banlieue-banlieue	1.241 (0.7033)
Nombre de véhicules par actif inférieur à 1	-0.6774 (0.4009)
Age de l'individu est inférieur à 30 ans	-0.6610 (0.2464)
Age de l'individu est supérieur à 50 ans	0.0396 (0.3782)
Le travailleur est une femme	-0.5454 (0.2368)
Le travailleur commence son travail entre 08H00 et 09H00	0.1097 (0.2751)
Le travailleur commence son travail entre 09H00 et 10H00	0.393 (0.3094)
Variance du mode véhicule particulier relativement au mode transports en commun	0.8864 (0.3356)
Statistiques descriptives	
Log-vraisemblance, constante seule	-599.55
Log-vraisemblance au point de convergence	-336.2912
Taille de l'échantillon	865
Nombre de paramètres	18
Statistique du rapport de vraisemblance.	526.52

TAB. 4.7 – Table des estimations des modèles (suite)

Choix du mode de transport : probabilité de choisir un véhicule particulier	
Variables expliquée : choix observé (VP :51.45%, TC :48.45% sur l'échantillon)	Paramètres (écarts-type entre parenthèses)
Variables explicatives	Box-Cox Logit Model
Coût du trajet	-0.1566 (-11.3347)
Temps du trajet	-0.0401 (-12.6441)
Revenu journalier de l'individu	-0.0016 (-0.9504)
Revenu journalier de l'individu et réside en banlieue	0.0021 (1.1307)
l'individu réside en banlieue	0.6247 (1.2783)
Nombre de changement en transport en commun	0.07504 (0.5766)
Le travailleur commence son travail entre 08H00 et 09H00	0.0033 (0.0118)
Le travailleur commence son travail entre 09H00 et 10H00	0.03742 (0.1172)
Transformations de Box-Cox	Estimations
Coût du trajet	-0.8883 (-6.3767)
Temps du trajet	1.1870 (5.7171)
Statistiques descriptives	
Log-vraisemblance, constante seule	-529.211
Log-vraisemblance au point de convergence	-290.837
Taille de l'échantillon	865
Nombre de paramètres	11
Statistique du rapport de vraisemblance.	616.747

TAB. 4.8 – Table des estimations des modèles (suite et fin)

Chapitre 5

Optimisme, pessimisme, primes de couverture contre le risque de perte en temps : une application aux déplacements aériens professionnels.

Introduction.

La demande de transport n'échappe pas aux incertitudes de l'environnement dans lequel elle se réalise. Il est peu crédible d'admettre pouvoir prévoir avec probabilité égale à 1 quelle sera la durée d'un déplacement, étant donnés une origine, une destination, un moyen de transport, un itinéraire et un horaire. Cette décision de procéder à un déplacement dans l'espace et le temps d'une certaine façon n'induit aucune certitude sur son exacte durée. Bien que la réalité suggère que chacun ait ses propres croyances sur les conséquences possibles d'une action, voir par exemple Savage(1954), nous supposerons ici un cadre plus restreint où le décideur dispose de fait des distributions de probabilité objectives (fréquences observées par exemple) des conséquences possibles associées à une décision. L'incertain est probabilisé, laissant

place à un environnement désormais considéré comme risqué.

Le modèle de l'espérance de l'utilité (EU), proposé par von Neumann et Morgenstern(1944) constitue le modèle pionnier de l'analyse des choix dans ce cadre. Sa diffusion et acceptation par la communauté scientifique est liée à la fois à l'attractivité de son axiomatique fondamentale, mais aussi à sa structure mathématique formelle, permettant une pratique simple dans l'application de ses propriétés pour différents contextes. L'expérimentation et l'analyse des faits observés remettent cependant souvent en cause les normes comportementales sur lesquelles il a été construit, suggérant leur insuffisance et la nécessité de les étendre. De nombreux auteurs ont contribué à l'identification et l'extension de ces limites. Nous renvoyons le lecteur aux travaux de Cohen et Tallon(2000), et Garello(2004) pour un exposé détaillé des modèles de décision dans le risque et l'incertain, leurs portées et leurs limites. En particulier, le paradoxe mis en évidence par Allais(1953) dans l'axiomatique du modèle EU semble avoir bénéficié d'une attention particulière, ayant donné naissance à un très large champ de recherches et expérimentations. Le fait que les probabilités caractérisant le potentiel de réalisation des différentes conséquences d'une décision entrent de façon linéaire dans l'évaluation de l'utilité que retire le décideur de cet acte est remis en cause dans de nombreux cadres. Comme le souligne Yaari(1987), Cohen et Tallon(2000), Chateauneuf(1999), Chateauneuf Cohen(1994), l'impossibilité de pouvoir distinguer son attitude face au risque, ce que nous pourrions qualifier sa confiance en la chance (ou malchance), de la façon dont il perçoit l'utilité (ou la satisfaction) que lui fournit une conséquence particulière signifie que nous ne pouvons pas distinguer ses croyances en la chance de la façon dont il mesure les niveaux de bien-être associés aux différentes conséquences. Son aversion ou goût pour le risque se caractérise entièrement par une utilité marginale décroissante que lui fournit la consommation de différentes quantités profitables données. Il est impossible de distinguer le type d'aversion pour le risque, faible ou forte, de l'utilité marginale décroissante. Cette confusion entre deux concepts fondamentalement différents, attitudes et perceptions, induit une rupture du cadre EU avec de nombreux comportements observés, par exemple l'attraction pour la certitude.

Nous faisons appel, pour notre problématique, à la théorie de l'espérance d'utilité dépendante du rang (EUDR), initialement proposée par Quiggin(1982). A l'axiome d'indépendance est substitué le principe de la chose sûre comonotone dans le risque, que nous présentons et discutons plus avant. Les probabilités d'occurrence des conséquences d'une décision entrent désormais de façon non linéaire dans l'évaluation de

l'utilité que fournit la loterie associée. L'idée consiste à faire dépendre ces probabilités du rang des conséquences auxquelles elles sont associées, ces dernières étant ordonnées de la plus favorable à la moins favorable. Nous adaptons l'axiomatique développée par Chateauneuf(1999) au cours de la présentation de notre modèle. Trois points les différencient : le support des distributions de probabilité est celui des pertes et non des gains. Il est ordonné de la plus petite à la plus grande des pertes. L'utilité dans le certain sur le support des pertes est une fonction décroissante : il s'agit du coût du temps de transport. L'axiomatique conduit à une transformation de la fonction de répartition de distribution des probabilité, et non la fonction décumulée, sur l'espace des conséquences dans le processus d'évaluation de la satisfaction qu'elle engendre. Cette transformation influence l'attitude face au risque d'un individu. Il connaît la vraie distribution sur les résultats élémentaires, mais il peut avoir par exemple tendance à surpondérer l'occurrence des mauvaises conséquences. Nous pouvons le considérer dans ce cas comme pessimiste dans le risque. De même, un individu qui a tendance à surpondérer l'occurrence des meilleures conséquences est dit optimiste dans le risque. Décrire de façon explicite l'influence de l'attitude face au risque de perte en temps de transport dans les décisions relatives à l'organisation d'un déplacement permet de mieux comprendre certaines des réactions de la demande associée, et offre plus de réalisme dans son interprétation.

Dans les contrats de transport, le temps n'est pas le seul déterminant à intervenir. D'autres attributs, tels le coût, le confort, la sécurité,..., interviennent dans l'évaluation de l'utilité totale que fournit le choix d'un contrat. Nous supposons qu'il n'existe aucune incertitude relative d'autres attributs que le temps de transport. Dans notre cadre, le choix d'un contrat de transport est la consommation d'un panier constitué de caractéristiques certaines et d'une distribution de probabilité sur les durées du trajet, connues par le voyageur. Le voyageur choisit la loterie de transport qui maximise son niveau d'utilité EUDR. Cette utilité inclut les caractéristiques certaines du contrat de transport et la distribution des durées du trajet. Il peut exister des arbitrages entre attributs certains et distributions de probabilité. L'environnement dans lequel il prend sa décision est risqué, et pour un ensemble de caractéristiques certaines et distributions connues, il choisit selon sa relation de préférence celle qui assure le niveau de satisfaction le plus grand. Sa relation de préférence résulte de caractéristiques qui lui sont propres. La prime de couverture contre le risque de perte en temps, extension à l'environnement risqué du concept de valeur du temps, est présentée et discutée. Elle est définie comme une valeur monétaire compensatrice du

différentiel d'utilité induit par un changement entre deux distributions des temps de trajet, toutes choses restant égales par ailleurs.

Empiriquement, pour un ensemble de contrats de transport donné, nous observons le choix effectif du décideur, sa réponse à cette offre. Nous supposons que son comportement satisfait à l'axiomatique EUDR. Le choix observé résulte par hypothèse d'un comportement de maximisation de l'utilité EUDR. En tant qu'observateur, certains des déterminants de l'utilité totale d'un individu ne sont pas observables. Les sources sont multiples : Thurstone(1927) parle de stimuli physiologiques et psychologiques non mesurables ; Luce(1959), Marshack(1959), Block et Marshack(1960) parlent de variabilité des goûts dans une population ; Manski(1977) identifie aussi les erreurs dans les mesures révélées par les décideurs et les "proxy" comme source d'hétérogénéité d'un échantillon. L'utilité totale d'un individu est une variable aléatoire pour l'observateur.

Pour une population de décideurs a priori identiques et indépendants, c'est-à-dire dont les caractéristiques observables sont similaires, placés face à un même ensemble de choix, nous supposons qu'il existe une hétérogénéité inobservable. Pour un ensemble de contrats de transport donné, il n'est pas possible de déterminer avec probabilité égale à 1 le choix d'un individu en le tirant au hasard dans la population. Cependant, le choix observé pour chacun des décideurs résulte par hypothèse d'un comportement de maximisation de l'utilité EUDR. Nous établissons le lien entre notre modèle d'échantillonnage et les comportements individuels de maximisation de l'utilité en définissant l'égalité entre la probabilité d'observer un contrat de transport parmi un ensemble connu en tirant un individu au hasard dans la population et la probabilité de tirer un individu qui maximise son niveau d'utilité EUDR pour ce contrat.

Quelques hypothèses techniques supplémentaires nous permettent de définir un cadre empirique fonctionnel pour une application à la demande adressée à deux itinéraires aériens sur le corridor origine-destination Paris-Londres, exprimée par une population de voyageurs réguliers se déplaçant au moins une fois par semaine pour motifs professionnels, et effectuant leur aller-retour au cours d'une même journée. L'échantillon est circonscrit aux voyageurs abonnés d'une unique compagnie aérienne, qui propose les trajets de l'aéroport Charles-de-Gaulles, terminal 2 (CDG2) aux aéroports London City Airport (LCY) ou London Heathrow (LHR). L'échantillon observé couvre une période de quatre mois au cours de la grille été 2002. Pour chaque date de réservation d'un billet par un individu, nous supposons qu'il dispose

de l'ensemble des distributions des temps de trajet sur les deux itinéraires, recalculées à partir des durées réalisées depuis la date d'ouverture de la grille jusqu'à la veille de la date de réservation. Cet exemple semble particulièrement adapté à la notion de fiabilité de l'offre de services de transport aérien, en particulier la régularité et le respect des conditions programmées définissant les différents contrats de voyage. Les estimations de notre modèle paramétrique conduisent à nous faire penser que les voyageurs sont optimistes et faiblement averse au risque de perte en temps de transport. Les valeurs de nos paramètres confortent aussi l'inadéquation du cadre EU.

5.1 Le cadre théorique.

Souligné dans l'article de Diecidue et Wakker(2000), la dépendance au rang énonce que le poids accordé à une conséquence dépend du rang de cette conséquence dans la liste ordonnée de toutes celles possibles. L'importance que porte l'individu à une conséquence particulière ne dépend pas seulement de sa probabilité objective d'occurrence, mais aussi de la probabilité d'obtenir autre chose, meilleur ou pire. L'attitude du décideur face au risque conditionne ses croyances en cette possibilité d'obtenir mieux ou non. Sous-jacent à cette idée, les notions d'optimisme et pessimisme interviennent. L'individu connaît la distribution objective des probabilités d'occurrence des conséquences, mais il peut avoir une tendance, naturelle ou résultant d'un comportement délibéré, à ne pas percevoir celle-ci telle qu'elle est, et à la transformer de façon adaptée à ses croyances en la chance (ou la malchance).

Prenons l'exemple suivant, où le décideur évalue une loterie représentant les durées possibles de son temps de transport, caractérisée par le triplet $(p_1, 1; p_2, 1.5; p_3, 2)$, i.e. il peut allouer 1 heure avec probabilité p_1 , 1.5 heures avec probabilité p_2 , 2 heures avec probabilité p_3 , $p_1 + p_2 + p_3 = 1$. 1 heure est la meilleure des réalisations car il s'agit de la plus petite allocation possible, et 2 heures est la plus défavorable des conséquences. S'il est pessimiste, il accorde plus d'importance qu'il n'en faut aux plus mauvaises des réalisations¹, 1.5 heures et 2 heures. Notons alors $\psi(p_2 + p_3) > p_2 + p_3$. Sur les deux conséquences restantes, toujours parce qu'il est pessimiste, il va affecter plus d'importance qu'il n'en faut à la plus mauvaise des deux restantes, 2 heures, i.e celle qui a la rang le plus élevé dans la liste ordonnée de toutes celles possibles.

¹L'individu accorde moins d'importance à l'événement le plus favorable.

Nous avons alors $\psi(p_3) > p_3$. La probabilité transformée d'obtenir un résultat moins favorable qu'une durée donnée est toujours plus grande que la probabilité objective d'obtenir un moins bon résultat que cette durée. La transformation de la fonction de répartition décumulée est concave. En termes de fonction de répartition (cumulée), la transformation est convexe.

Il est possible de concevoir plusieurs types de transformations pour caractériser la dépendance au rang, voir Kahneman et Tversky(1979), Wu et Gonzales(1999). Nous nous plaçons dans le cadre où les transformations de distributions favorisent seulement un type de résultats élémentaires (les bons ou les mauvais).

5.1.1 Axiomatique.

Dans notre contexte, la décision de l'individu concerne sa demande de transport : origines, destinations, modes, horaires, et itinéraires des déplacements conditionnent la distribution des durées du trajet. Nous notons \mathbb{L} l'ensemble des loteries, distributions de probabilité à support fini dans \mathbb{C} , intervalle de \mathbb{R} . Chaque loterie $\mathcal{L} \in \mathbb{L}$ représente une distribution des temps de transport pour un ensemble d'origines et destinations, un ensemble de modes de transport, et un ensemble d'horaires et itinéraires. Les conditions de mobilité résultantes en termes de temps de transport sont probabilisées.

L'allocation superflue de ressources en temps à l'activité intermédiaire de transport est désutile au voyageur. Le temps alloué au transport est une perte, puisqu'il s'agit d'une activité ni lucrative, ni profitable en soi : plus le consommateur doit allouer du temps à son activité de transport, moins il peut se livrer à des activités qui lui assurent satisfaction. Nous formulons l'axiomatique du modèle en termes de pertes en temps de transport. \mathbb{C} représente les niveaux possibles de ces dernières. Nous notons $t_i \in \mathbb{C}$ la i -ième conséquence envisageable, et nous supposons la liste de toutes les conséquences ordonnée de la plus petite valeur à la plus grande : $t_1 \leq \dots \leq t_K$, où $k = 1, \dots, K$ est le rang de la conséquence. Plus la valeur k du rang est élevée, plus la perte est importante.

\succsim définit une relation binaire représentant la relation de préférence du décideur entre deux loteries. Nous supposons que \succsim établit un préordre total sur \mathbb{L} , c'est-à-

dire respectant les axiomes de complétude et réflexivité², et transitivité³.

Une loterie \mathcal{L} est représentée par un vecteur $\mathbf{p} = (p_1, \dots, p_K) \in [0, 1]^K$ défini sur le support (t_1, \dots, t_K) , c'est-à-dire que la conséquence t_k peut occurrer avec probabilité p_k lorsque la loterie \mathcal{L} est choisie. Par construction, $\sum_{k=1}^K p_k = 1$. Lorsqu'une loterie \mathcal{L} permet d'obtenir une conséquence particulière t_k avec probabilité égale à 1, elle est certaine et $p_k = 1$. Nous distinguons ces loteries particulières dans \mathbb{L} en les notant δ_{t_k} , $k = 1, \dots, K$, où δ est la masse de Dirac associée au point t_k du support. L'individu préfère toujours éviter perdre du temps avec certitude : $\delta_{t_1} \succ \dots \succ \delta_{t_K}$. Le préordre de préférence de l'individu sur l'espace des loteries certaines est donné par l'ordre naturel de leurs valeurs sur \mathbb{R} .

Definition 2 (Espérance d'Utilité Dépendante du Rang) Une fonction $U : \mathbb{L} \rightarrow \mathbb{R}$ représente \succ si et seulement si $\mathcal{L}_m \succ \mathcal{L}_j \Leftrightarrow U(\mathcal{L}_m) \geq U(\mathcal{L}_j)$, $\forall \mathcal{L}_m, \mathcal{L}_j \in \mathbb{L}$. L'espérance d'utilité dépendante du rang (EUDR) est satisfaite s'il existe une fonction continue strictement décroissante $u : (\mathbb{C}, \mathcal{B}_{\mathbb{C}}) \rightarrow \mathbb{R}$ et une fonction continue strictement croissante $\psi : [0, 1] \rightarrow [0, 1]$, $\psi(0) = 0$ et $\psi(1) = 1$ telles que la relation \succ soit représentée par la fonctionnelle suivante :

$$U(\mathcal{L}) = \sum_{k=1}^K \left(\psi \left(\sum_{j=1}^k p_j \right) - \psi \left(\sum_{j=1}^{k-1} p_j \right) \right) u(t_k), \quad (5.1)$$

Dans ce cadre, u est définie à un transformation affine monotone croissante près et ψ est unique.

Pour notre définition, la transformation ψ concerne la fonction de répartition de la distribution. \succ doit satisfaire à d'autres axiomes que la complétude, la réflexivité et la transitivité pour vérifier la définition de l'utilité espérée dépendante du rang. Un

²Prenons une paire $(\mathcal{L}_i, \mathcal{L}_j) \in \mathbb{L} \times \mathbb{L}$. En toute logique, le décideur peut énoncer quatre solutions lors de la comparaison des deux loteries de la paire : soit $(\mathcal{L}_i \succ \mathcal{L}_j)$ et $(\mathcal{L}_i \preceq \mathcal{L}_j)$, encore noté $(\mathcal{L}_i \sim \mathcal{L}_j)$ représentant l'indifférence ; soit $(\mathcal{L}_i \succ \mathcal{L}_j)$ et $non(\mathcal{L}_i \preceq \mathcal{L}_j)$, ou encore $non(\mathcal{L}_i \succ \mathcal{L}_j)$ et $(\mathcal{L}_i \preceq \mathcal{L}_j)$, aussi notés $(\mathcal{L}_i \succ \mathcal{L}_j)$ et $(\mathcal{L}_i \prec \mathcal{L}_j)$, caractérisant la préférence stricte ; soit finalement $non(\mathcal{L}_i \succ \mathcal{L}_j)$ et $non(\mathcal{L}_i \preceq \mathcal{L}_j)$. Cette dernière solution est problématique car elle énonce que les loteries ne sont pas comparables. Il y a contradiction avec le fait qu'elles soient de mêmes types (loteries simples) et définies sur le même support de réalisation. Nous supposons donc que la non comparabilité est une solution impossible. En d'autres termes, \succ est une relation de préférence complète : pour toute paire de loterie, soit il y a stricte préférence, soit indifférence.

³Comparer deux options de choix, quelles qu'elles soient, ne signifie pas pouvoir établir une liste ordonnée selon les préférences, de la plus favorable à la moins favorable par exemple, de l'ensemble des loteries. La transitivité est une condition nous permettant de nous assurer de l'existence d'un préordre stable. Soient $\mathcal{L}_i, \mathcal{L}_j, \mathcal{L}_k \in \mathbb{L}$ et $\mathcal{L}_i \succ \mathcal{L}_j$ et $\mathcal{L}_j \succ \mathcal{L}_k$. Alors $\mathcal{L}_i \succ \mathcal{L}_k$.

axiome de continuité permet de supposer qu'il n'y a pas de saut dans les préférences du décideur.

Axiom 6 (Continuité) Soient $\mathcal{L}_n, \mathcal{L}_1, \mathcal{L}_2 \in \mathbb{L}$ telles que \mathcal{L}_n converge en loi vers \mathcal{L}_1 . Alors $\{\mathcal{L}_n \succcurlyeq \mathcal{L}_2, \forall n\} \Rightarrow \mathcal{L}_1 \succcurlyeq \mathcal{L}_2$ et $\{\mathcal{L}_n \preccurlyeq \mathcal{L}_2, \forall n\} \Rightarrow \mathcal{L}_1 \preccurlyeq \mathcal{L}_2$.

La dominance stochastique d'ordre 1 est telle que

$$\forall \mathcal{L}_m, \mathcal{L}_{m'} \in \mathbb{L}, \mathcal{L}_m DS1 \mathcal{L}_{m'} \Leftrightarrow \sum_{k=1}^j p_{mk} \leq \sum_{k=1}^j p_{m'k}, \forall j = 1, \dots, K. \quad (5.2)$$

Lorsqu'il y a au moins une inégalité stricte, nous notons dans ce cas de dominance stricte $\mathcal{L}_m DS1^* \mathcal{L}_{m'}$. Une loterie \mathcal{L}_m domine stochastiquement à l'ordre 1 une autre loterie $\mathcal{L}_{m'}$ lorsque pour toute conséquence possible, la probabilité de perdre plus de temps de transport avec \mathcal{L}_m est supérieure ou égale à la probabilité de perdre plus de temps de transport avec $\mathcal{L}_{m'}$.

Axiom 7 (Monotonie) \succcurlyeq est une relation monotone au sens de la dominance stochastique d'ordre 1 :

1. $\forall \mathcal{L}_m, \mathcal{L}_{m'} \in \mathbb{L}, \mathcal{L}_m DS1 \mathcal{L}_{m'} \Rightarrow \mathcal{L}_m \preccurlyeq \mathcal{L}_{m'}$.
2. $\forall \mathcal{L}_m, \mathcal{L}_{m'} \in \mathbb{L}, \mathcal{L}_m DS1^* \mathcal{L}_{m'} \Rightarrow \mathcal{L}_m \prec \mathcal{L}_{m'}$.

La monotonie des préférences peut être caractérisée par d'autres formulations. Dans notre cadre, elle établit un préordre partiel entre les loteries dont les fonctions de répartition ne se croisent en aucun point du support des pertes en temps de trajet. La loterie préférée dans ce préordre partiel est celle qui est dominée stochastiquement à l'ordre 1 par toutes les autres présentes dans le préordre partiel.

Lorsque \mathbb{L} est réduit à l'espace des loteries dégénérées définies sur le support des pertes en temps de transport, l'axiomatique précédente est nécessaire et suffisante à l'existence d'une fonction d'utilité continue strictement décroissante $u : (\mathbb{C}, \mathcal{B}_{\mathbb{C}}) \rightarrow \mathbb{R}$ représentant \succcurlyeq (voir Debreu(1954)). L'axiomatique doit être complétée pour s'accorder à la définition de la fonctionnelle EUDR.

Axiom 8 (Chose sûre comonotone dans le risque) Soit deux loteries $\mathcal{L}_m = \sum_{k=1}^K p_k \delta_{x_k}$ et $\mathcal{L}_{m'} = \sum_{k=1}^K p_k \delta_{y_k}$, avec $x_1 \leq \dots \leq x_{k^*} \leq \dots \leq x_K$ et $y_1 \leq \dots \leq y_{k^*} \leq \dots \leq y_K$, deux sous ensembles ordonnés de (t_1, \dots, t_K) ayant le k^* -ième résultat élémentaire en commun, $x_{k^*} = y_{k^*}$. Soient les loteries $\tilde{\mathcal{L}}_m$ et $\tilde{\mathcal{L}}_{m'}$ obtenue en remplaçant x_{k^*} ($= y_{k^*}$) par $x_{\tilde{k}}$ de telle sorte que $x_{k^*-1} \leq x_{\tilde{k}} \leq x_{k^*+1}$ et $y_{k^*-1} \leq x_{\tilde{k}} \leq y_{k^*+1}$. Alors $\mathcal{L}_m \succcurlyeq \mathcal{L}_{m'} \Rightarrow \tilde{\mathcal{L}}_m \succcurlyeq \tilde{\mathcal{L}}_{m'}$.

Le principe de la chose sûre comonotone dans le risque énonce que si deux loteries ont un résultat en commun avec la même probabilité d'occurrence, alors la valeur de ce résultat n'a aucune influence sur l'ordre des préférences entre ces deux loteries tant qu'il occupe le même rang dans l'ordre naturel des résultats élémentaires des deux loteries.

Axiom 9 (Indépendance des mixages comotonnes) Soit $\delta_a \preceq \delta_b \preceq \delta_c \preceq \delta_d$ et $\delta_{x_1} \succ \delta_{y_1}$. $\forall \alpha, \beta \in [0, 1]$,

1.

$$\mathcal{L}_1 = (1 - \alpha) \delta_{x_1} + \alpha \delta_a \sim \mathcal{Q}_1 = (1 - \alpha) \delta_{y_1} + \alpha \delta_b$$

et

$$\mathcal{L}_2 = (1 - \alpha) \delta_{x_1} + \alpha \delta_c \sim \mathcal{Q}_2 = (1 - \alpha) \delta_{y_1} + \alpha \delta_d$$

impliquent

$$\beta \mathcal{L}_1 + (1 - \beta) \mathcal{L}_2 \sim \beta \mathcal{Q}_1 + (1 - \beta) \mathcal{Q}_2;$$

2.

$$\mathcal{L}_1 = (1 - \alpha) \delta_a + \alpha \delta_{x_1} \sim \mathcal{Q}_1 = (1 - \alpha) \delta_b + \alpha \delta_{y_1}$$

et

$$\mathcal{L}_2 = (1 - \alpha) \delta_c + \alpha \delta_{x_1} \sim \mathcal{Q}_2 = (1 - \alpha) \delta_d + \alpha \delta_{y_1}$$

impliquent

$$\beta \mathcal{L}_1 + (1 - \beta) \mathcal{L}_2 \sim \beta \mathcal{Q}_1 + (1 - \beta) \mathcal{Q}_2;$$

Ce dernier axiome permet de séparer la transformation de la fonction de répartition de la distribution de probabilité et l'utilité dans le certain.

Theorem 10 Il existe une fonction d'utilité EUDR représentant \succ si et seulement si \succ est une relation de préférence sur \mathbb{L} complète, transitive, satisfaisant aux axiomes de la chose sûre comonotone dans le risque et de l'indépendance des mixages comotonnes.

Proof. Chateauneuf(1999). ■

Nous supposons que les préférences d'un décideur satisfont désormais à l'axiomatique sous-jacente de la représentation de celles-ci par une fonctionnelle EUDR.

5.1.2 Propriétés générales.

L'attitude du consommateur face au risque est caractérisée à la fois par la fonction de transformation des distributions de probabilité et la forme de la fonction d'utilité $u(\cdot)$. Dans notre cadre de demande de transport, il paraît crédible de penser que $u(\cdot)$ est une fonction de coût du temps de transport quasi-convexe. Cette intuition est relative à deux arguments, l'un de nature quantitative, et l'autre de nature organisationnelle. Le premier est évident, puisque toute allocation superflue (plus que nécessaire) de temps à l'activité de transport engendre une perte de ressources en temps pouvant être allouée à d'autres activités utiles. Le second argument stipule qu'en présence de contrainte horaires dans l'organisation du trajet, toute déviation de l'horaire optimal d'arrivée engendre un coût supplémentaire à celui du transport lui-même. Ce coût de déshorage est bilatéral et asymétrique, puisque l'individu peut alors arriver en avance (par exemple dans le cas d'une réalisation favorable du temps de parcours à horaire de départ donné) ou en retard par rapport à son horaire programmé. Le coût est asymétrique car il semble naturel de penser qu'arriver en avance est moins défavorable qu'arriver en retard, surtout lorsqu'il s'agit d'une activité mandataire à réaliser à destination.

Concernant la fonction de transformation des fonctions de répartition des distributions de probabilités, $\psi : [0, 1] \rightarrow [0, 1]$, certaines de ses propriétés donnent un sens à l'attitude de l'individu face au risque, conjointement à la forme de la fonction du temps dans le certain. Chew, Karni et Safra(1987) énoncent qu'un individu a de l'aversion forte⁴ pour le risque si et seulement si ψ est une fonction convexe et $u(\cdot)$ une fonction concave. Dans ce cas, pour chaque réalisation possible du support des pertes de temps, l'individu surestime la probabilité d'obtenir un temps de transport moins favorable, et le coût marginal du temps de transport est croissant avec la durée. Quiggin(1982) énonce aussi que l'individu a de l'aversion faible pour le risque⁵ si et seulement si ψ est une fonction concave lorsque u est une fonction concave. Dans ce cas, pour chaque réalisation possible du support des pertes, l'individu surestime la probabilité d'obtenir un résultat plus favorable, et le coût marginal du temps de transport est croissant avec la durée.

⁴Rotschild et Stiglitz(19??) énoncent qu'un individu a de l'aversion forte pour le risque si pour tout couple de variables aléatoires, telles que celles-ci aient même espérance, alors il préfère celle qui est moins risquée au sens de la dominance stochastique d'ordre 2.

⁵Arrow(19??) et Pratt(19??) énoncent qu'un décideur a de l'aversion faible pour le risque si pour toute variable aléatoire, il préfère à celle-ci la certitude d'obtenir la valeur de son espérance.

Chateauneuf et Cohen(1994) précisent un résultat d'importance : l'individu peut aussi avoir de l'aversion faible pour le risque avec une fonction de coût dans le certain convexe et une fonction de transformation convexe. Dans ce cas, le degré de convexité de la transformation, ou encore l'intensité du pessimisme de l'individu, compense le fait que le coût marginal soit décroissant avec le niveau du temps de transport.

5.2 Primes d'épargne de temps de transport.

Nous souhaitons utiliser le cadre général précédent dans un problématique de demande de transport. Nous nous focalisons sur la valorisation des allocations de ressources temporelles dans ce contexte, et nous supposons pour simplifier que dans un contrat de transport, seules les durées de trajet sont incertaines, et cette incertitude est probabilisée : les choix de transport sont risqués.

5.2.1 Le modèle.

Un contrat de transport est constitué d'un ensemble de caractéristiques certaines x , d'une loterie \mathcal{L} représentée par une distribution de probabilité $\mathbf{p} = (p_1, \dots, p_K)$ définie sur le support ordonné des temps de trajet (t_1, \dots, t_K) . L'individu, caractérisé par un ensemble de variables S , doit payer un prix c pour utiliser ce contrat (x, \mathcal{L}) . L'utilité totale que fournit un panier (c, x, \mathcal{L}) à un individu de caractéristiques S est notée $W_S(c, x, \mathcal{L})$.

Condition 11 (Séparabilité des préférences) *Les préférences sont séparables entre les déterminants certains de l'utilité totale et la loterie sur les temps de trajet.*

L'utilité du voyageur est définie par une expression qui repose sur une séparation des préférences permettant de distinguer l'aspect certain de son utilité et l'aspect relevant du risque environnemental, portant ici sur les durées des trajets envisageables. Dans le transport aérien, dans la mesure où pour un même vol, des individus de caractéristiques différentes payant des coûts différents pour s'assurer des niveaux de services différents voyagent dans le même avion, ils font face à la même incertitude concernant le temps de leur trajet. La durée du vol ne dépend pas des caractéristiques des voyageurs et des attributs certains des contrats de transport.

Condition 12 *Les préférences sur les loteries satisfont à l'axiomatique EUDR.*

Cette axiomatique est plus générale que celle du cadre de l'espérance d'utilité. Sous cette condition supplémentaire, l'utilité totale de l'individu peut s'écrire sous forme additive :

$$W_S(x, c, \mathcal{L}) = v(x, c, S) + U(\mathcal{L}), \quad (5.3)$$

où $v(x, c, S)$ représente le niveau d'utilité associé à la consommation d'attributs de transport certains x à un coût c par un individu de caractéristiques S , et où

$$U(\mathcal{L}) = \sum_{k=1}^K \left(\left(\sum_{j=1}^k p_j \right)^\lambda - \left(\sum_{j=1}^{k-1} p_j \right)^\lambda \right) u(t_k) \quad (5.4)$$

est la fonctionnelle EUDR, avec

$$\forall k = 1, \dots, K, u(t_k) = \alpha \frac{t_k^\mu - 1}{\mu} \quad (5.5)$$

En comparant l'équation (5.4) avec l'équation (5.1), la fonction ψ de transformation de la fonction de répartition d'une distribution de temps de trajet est la fonction puissance, $\forall x \in [0, 1]$, $\psi(x) = x^\lambda$. λ est le degré de transformation des fonctions de répartition des distributions des temps de parcours. La convexité, ou concavité de la transformation de la fonction de répartition est assurée par la valeur de λ , dont le pivot est $\lambda = 1$, c'est-à-dire le cas de la non transformation de la distribution de probabilité : nous retrouvons alors le modèle classique de l'espérance d'utilité. Lorsque $\lambda < 1$, ψ est concave : l'individu est optimiste dans le risque. Il accorde plus d'importance aux événements défavorables. Lorsque $\lambda > 1$, ψ est convexe : l'individu est pessimiste dans le risque. Il accorde plus d'importance aux événements favorables.

α est l'effet sur le niveau total d'utilité du montant du coût ressenti lié à une durée t_k . Par hypothèse, $u(\cdot)$ est une fonction strictement décroissante. u s'interprète comme le coût ressenti du temps dans le certain. Pour notre spécification dans l'équation (5.5), c'est une condition vérifiée si et seulement si

$$\alpha < 0. \quad (5.6)$$

Cette contrainte signifie que quel que soit le montant de l'allocation de temps au transport, il diminue le niveau d'utilité total de l'individu.

$\frac{t_k^\mu - 1}{\mu}$ est la transformation de Box et Cox(1964) associée à la k -ième réalisation t_k du support strictement positif des durées. Il s'agit d'un cas particulier de la classe

de transformation définie par Tukey(1957), satisfaisant

$$\forall \mu \in \mathbb{R}, \forall t_k \in \mathbb{R}_{+*}, r(t_k, \mu) = \begin{cases} \frac{t_k^\mu - 1}{\mu} & \text{si } \mu \neq 0 \\ \ln(t_k) & \text{si } \mu = 0 \end{cases}. \quad (5.7)$$

Une telle fonction possède la flexibilité nécessaire pour représenter le profil du coût du temps dans le certain avec $\alpha < 0$. $\mu > 1$ modélise un coût ressenti du temps dans le certain concave, $\mu = 1$ un coût linéaire, et $\mu < 1$ un coût convexe.

L'individu est fortement averse au risque de perte de temps de transport si la fonction de coût ressenti dans le certain est concave et la fonction de transformation convexe, c'est-à-dire lorsque $\mu \geq 1$ et $\lambda > 1$. L'individu est faiblement averse au risque de perte de temps de transport si la fonction de coût ressenti dans le certain est concave et la fonction de transformation concave, c'est-à-dire lorsque $\mu \geq 1$ et $\lambda < 1$. L'individu est aussi faiblement averse au risque de perte de temps de transport si la fonction de coût ressenti dans le certain est convexe et la fonction de transformation convexe, c'est-à-dire lorsque $\mu < 1$ et $\lambda > 1$. Dans ce cas, le degré de convexité de la transformation, ou encore l'intensité du pessimisme de l'individu, compense le fait que le coût marginal soit décroissant avec le niveau de l'allocation en temps.

5.2.2 Définition.

Quel est le prix qu'est prêt à payer l'individu pour se couvrir partiellement ou totalement contre d'éventuelles pertes de ressources en temps et maintenir son niveau d'utilité inchangé? Dans quelles mesures adapter les tarifications individuelles du trajet lorsque la distribution des durées sur celui-ci se modifie? Nous proposons ici une extension du concept de valeur du temps à la présence de risque environnemental. Notre définition repose sur la construction d'une variation monétaire compensatrice d'une variation de la distribution des temps de parcours, les caractéristiques certaines du contrat de transport restant invariantes. Quel est son montant lorsque la distribution des temps de parcours se modifie?

Considérons un contrat de transport (x, \mathcal{L}) offert à un coût monétaire c . Notons \mathbf{p} la distribution de probabilité correspondante, définie sur le support ordonné des temps de parcours. Notons $\mathbf{q} = (q_1, \dots, q_K)$ la distribution de probabilité remplaçant \mathbf{p} . Le contrat de transport est désormais (x, \mathcal{Q}) , où \mathcal{Q} est la nouvelle loterie. x, c

sont invariants. Le différentiel d'utilité induit par l'introduction de la distribution \mathbf{q} en remplacement de la distribution \mathbf{p} , est donné par l'expression suivante :

$$g(\mathbf{q}, \mathbf{p}, \lambda, \mu) = \alpha \sum_{k=1}^K \left(\left(\left(\sum_{j=1}^k q_j \right)^\lambda - \left(\sum_{j=1}^{k-1} q_j \right)^\lambda \right) - \left(\left(\sum_{j=1}^k p_j \right)^\lambda - \left(\sum_{j=1}^{k-1} p_j \right)^\lambda \right) \right) \frac{t_k^\mu - 1}{\mu}. \quad (5.8)$$

Cette fonction $g(\cdot)$ mesure le différentiel d'utilité espérée dépendante du rang entre deux distributions de temps de trajet. Elle dépend explicitement de l'attitude face au risque (λ) de la perception de la variable temps (μ), et des transferts de masses de probabilités entre les deux distributions. La compensation monétaire assurant l'invariance du niveau d'utilité suite au changement de distribution transite par une variation du coût du trajet. En notant c^* le nouveau coût monétaire,

$$w(c^* - c) \equiv v(x, c^*, S) - v(x, c, S), \quad (5.9)$$

où $c^* - c$ est le montant de la compensation, avec $w'(c^* - c) < 0$, $w''(c^* - c) \leq 0$ par construction de la fonction d'utilité v , fonction strictement décroissante du coût du trajet. w représente le surplus d'utilité lié à un changement du prix du trajet, et est supposée quasi-convexe car plus le différentiel de prix est important, plus le niveau d'utilité diminue rapidement. w est une fonction continue strictement croissante en le différentiel de prix, définie de façon unique à une transformation monotone croissante près. Nous supposons que la fonction w^{-1} existe : il s'agit de la valorisation monétaire d'un niveau de surplus d'utilité donné.

Definition 3 *La prime d'épargne de temps de transport, notée π est la solution en $c^* - c$ de l'équation $w(c^* - c) + g(\mathbf{q}, \mathbf{p}, \lambda, \mu) = 0$, soit*

$$\pi(\mathbf{q}, \mathbf{p}, \lambda, \mu) = w^{-1}(-g(\mathbf{q}, \mathbf{p}, \lambda, \mu)).$$

Il s'agit sous nos interprétations de w^{-1} et g de la valorisation monétaire du surplus d'utilité espérée suite au changement engendré par une modification de la distribution des durées de trajet. Remarquons par construction $-g(\mathbf{q}, \mathbf{p}, \lambda, \mu) = g(\mathbf{p}, \mathbf{q}, \lambda, \mu)$, et $\pi(\mathbf{q}, \mathbf{p}, \lambda, \mu) = w^{-1}(g(\mathbf{p}, \mathbf{q}, \lambda, \mu))$.

5.2.3 L'influence de l'attitude face au risque de perte.

Comment varie cette prime avec l'attitude face au risque de l'individu ? Le degré de concavité ou convexité de la fonction de transformation des distributions de probabilité détermine le degré de croyance en la chance du décideur. Cette propension à croire en certains types de conséquences conditionnent la propension à payer pour voir changer les distributions des durées de trajet.

Supposons pour éclaircir nos résultats que la nouvelle distribution \mathbf{q} domine stochastiquement à l'ordre 1 la distribution \mathbf{p} . Les propriétés de la prime de couverture deviennent plus faciles à étudier, puisque $g(\mathbf{p}, \mathbf{q}, \lambda, \mu) > 0$. Comme $w^{-1}(x) < 0, \forall x \in \mathbb{R}$, et d'après la définition de la prime de couverture, $\pi(\mathbf{q}, \mathbf{p}, \lambda, \mu) > 0$, nous avons

$$\pi'_\lambda(\mathbf{q}, \mathbf{p}, \lambda, \mu) = \frac{\partial w^{-1}}{\partial g} \frac{dg}{d\lambda}(\mathbf{p}, \mathbf{q}, \mathbf{t}, \lambda, \mu) < 0, \quad (5.10)$$

puisque $g'_\lambda(\mathbf{p}, \mathbf{q}, \lambda, \mu) < 0, \forall \lambda$. Le résultat est simple à interpréter : plus l'individu est optimiste dans le risque, moins il est prêt à payer pour voir le risque de perte en temps de transport diminuer, et réciproquement. Nous remarquons que $g''_\lambda(\mathbf{p}, \mathbf{q}, \lambda, \mu)$ est une fonction qui change de signe selon la valeur initiale de λ . Lorsque $\lambda > 1$, $g''_\lambda(\mathbf{p}, \mathbf{q}, \lambda, \mu) < 0$, et lorsque $\lambda < 1$, $g''_\lambda(\mathbf{p}, \mathbf{q}, \lambda, \mu) > 0$. Un voyageur déjà optimiste diminue de façon plus importante qu'un voyageur initialement pessimiste sa propension à payer pour la couverture contre le risque de perte en temps de transport lorsque la nouvelle distribution objective assure les événements favorables avec de plus grandes probabilités. Les croyances en la chance du décideur conditionne l'amplitude de sa propension à payer pour se couvrir

5.2.4 Particularités.

Equivalents certains.

Le calcul de la prime de couverture totale repose sur le concept d'équivalent certain. Un individu averse au risque, fortement ou faiblement, préfère les événements certains à la loterie elle-même. Dans notre cadre, l'individu préfère avoir à choisir des contrats de transport dont les durées des trajets sont certaines. En particulier quel est le montant monétaire qu'il est prêt à payer pour s'assurer avec certitude le temps moyen de trajet ? Question analogue, combien est-il prêt à payer pour s'assurer une durée offerte avec certitude pour son trajet ?

Relativement à notre définition de la prime, seule la fonction g est modifiée. Notons \bar{t} le temps moyen du trajet pour un contrat de transport (x, \mathcal{L}) offert à un coût monétaire c . Toutes choses égales par ailleurs, la différence d'utilité induite par la consommation d'un contrat de transport où la durée est certaine et égale au temps moyen de parcours à la place du contrat risqué lui-même est donnée par :

$$g(\bar{t}, \mathbf{p}, \lambda, \mu) = \alpha \left(\frac{\bar{t}^\mu - 1}{\mu} - \sum_{k=1}^K \left(\left(\sum_{j=1}^k p_j \right)^\lambda - \left(\sum_{j=1}^{k-1} p_j \right)^\lambda \right) \frac{t_k^\mu - 1}{\mu} \right). \quad (5.11)$$

Il s'agit du cas particulier où la nouvelle distribution est dégénérée, et propose avec probabilité égale à 1 le temps moyen de parcours. Les masses de probabilités sont toutes transférées et cumulées sur le point du support caractérisant le temps moyen du trajet associé à la loterie initiale.

Nous remarquons qu'une simple redéfinition de \bar{t} en tant que durée offerte avec certitude permet d'établir le calcul d'équivalents certains relativement à n'importe quel point du support (t_1, \dots, t_K) . Justifier le choix de certaines valeurs comme référentiels relève des objectifs de l'analyste et autorise de nombreuses définitions d'équivalents certains.

La valeur du temps retrouvée.

Nous pouvons aussi retrouver le concept classique de valeur du temps sous certaines restrictions dont l'interprétation est simple. Par définition, il s'agit du montant monétaire qu'est prêt à payer un individu pour voir son temps de trajet, certain, diminuer et conserver le même niveau d'utilité. Il s'agit du taux marginal de substitution dans le certain entre prix et durée du trajet. Dans notre cadre, la valeur du temps certain est le montant qu'est prêt à payer l'individu pour opérer une translation de la distribution sur le support des durées. Il s'agit d'un montant monétaire qui ne modifie que le moment du premier ordre de la distribution, c'est-à-dire sa localisation sur le support ordonné du plus petit au plus grand temps de trajet.

Notons pour simplifier la présentation des résultats $u(t_k) = \frac{t_k^\mu - 1}{\mu}$. La variation totale du niveau d'utilité induit par une variation du coût du trajet et un décalage du support de $dt \rightarrow 0$, c'est-à-dire une augmentation marginale de tous les temps

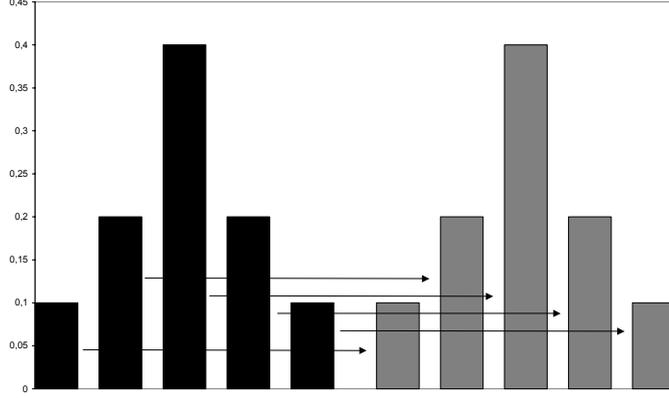


FIG. 5-1 – La valeur du temps certain : représentation dans le cadre EUDR.

de trajet réalisables, est donnée par :

$$dW_S(x, c, \mathcal{L}) = \frac{\partial v(x, c, S)}{\partial c} dc + \alpha \sum_{k=1}^K \left(\left(\sum_{j=1}^k p_j \right)^\lambda - \left(\sum_{j=1}^{k-1} p_j \right)^\lambda \right) \left(\frac{\partial u(t_k)}{\partial t_k} dt \right) \quad (5.12)$$

La variation monétaire nécessaire à assurer l'invariance du niveau d'utilité suite au décalage du support de la distribution est définie pour $dW_S(x, c, \mathcal{L}) = 0$ par

$$\frac{dc}{dt} = \frac{-\alpha \sum_{k=1}^K \left(\left(\sum_{j=1}^k p_j \right)^\lambda - \left(\sum_{j=1}^{k-1} p_j \right)^\lambda \right) \left(\frac{\partial u(t_k)}{\partial t_k} \right)}{\frac{\partial v(x, c, S)}{\partial c}}, \quad (5.13)$$

c'est-à-dire une somme des taux marginaux de substitution prix-temps dans le certain pondérés par les croyances en les réalisations de la durée du trajet. Dans le cas limite où $\lambda = 1$ et $\mathcal{L} = \delta_{t_{k^*}}$, cadre classique de la théorie du consommateur en environnement certain, nous retrouvons la définition classique de la valeur du temps,

$$\frac{dc}{dt} = \frac{-\alpha \frac{\partial u(t_{k^*})}{\partial t_{k^*}}}{\frac{\partial v(x, c, S)}{\partial c}}, \quad (5.14)$$

taux marginal de substitution prix-temps au point t_{k^*} caractérisant la durée certaine du trajet. Autre cas, limite, le modèle de l'espérance d'utilité lorsque $\lambda = 1$. Alors

$$\frac{dc}{dt} = \frac{-\alpha \sum_{k=1}^K p_k \frac{\partial u(t_k)}{\partial t_k}}{\frac{\partial v(x,c,S)}{\partial c}}, \quad (5.15)$$

c'est-à-dire l'espérance du taux marginal de substitution prix-temps. Notre définition en environnement risqué est plus générale : il s'agit de la valorisation monétaire liée à au différentiel d'utilité induit par la comparaison d'une même fonction de répartition transformée sur deux supports différents, dont l'un est une translation dans \mathbb{R} de l'autre.

5.3 Application au choix d'itinéraires aériens.

Les mécanismes de concurrence entre compagnies aériennes, mais aussi entre aéroports, incitent à la diversification de l'offre de réseaux aériens. Dans de nombreux cas, il est possible de pouvoir choisir entre plusieurs itinéraires entre une origine et une destination, soit parce que plusieurs aéroports localement accessibles proposent la même destination, soit parce qu'il y a plusieurs aéroports d'arrivées à destination, soit les deux. Il est aussi possible d'avoir des itinéraires directs et d'autres détournés vers une destination intermédiaire. L'observation de l'évolution du secteur aérien montre des formes de convergence sur les tarifs pratiqués et contenus des services associés aux grandes classes tarifaires : première classe, classe affaires, classe économique. Appuyées par la concurrence entre aéroports, conduisant à la concentration spatiale des itinéraires entre une origine et une destination, nous affirmons dans ce contexte l'importance de la fiabilité et régularité temporelle de l'offre comme facteur discriminant. Ce degré de différenciation dépend étroitement de l'attitude face au risque du voyageur et de l'importance qu'il accorde à ses ressources temporelles.

5.3.1 Le modèle d'échantillonnage.

Le cadre.

Certaines variables causales non observables conditionnent le comportement d'un individu : tout ce qui concerne sa personnalité, sa psychologie et sa physiologie, ne

peut être quantifié de façon objective, et introduit introduit un biais d'observation. Par exemple, concernant le thème de la demande de transport, le confort, la sécurité, la perception des services complémentaires au déplacement, sont des variables significatives qui influencent le choix final du contrat de voyage. Nous admettons dans la position de l'analyste d'une situation de choix donnée que nous ne pouvons décrire qu'approximativement le comportement d'un décideur que nous souhaitons observer. L'utilité totale qu'il retire d'un choix particulier est une variable aléatoire. Thurstone(1927, Marshack(1959), Block et Marshack(1960) légitiment dans leurs travaux ces sources d'inobservabilité par l'impossibilité de mesurer certains facteurs d'ordres psychologiques et physiologiques. Manski(1977) établit une typologie des sources d'inobservabilité auxquelles peut faire face le modélisateur dans la description du comportement décisionnel du consommateur. Il souligne les erreurs propres aux mesures statistiques, notamment les biais de mesures sur les variables continues et les variables proxy. Il souligne aussi la variabilité des goûts du consommateur, à comprendre dans le sens où ce dernier détermine l'importance qu'il accorde aux variables descriptives du contenu d'un choix à partir de facteurs inobservables lui étant propres.

Lorsque nous observons une population \mathcal{P} de N décideurs $n = 1, \dots, N$ supposés indépendants et identiques, placés face au même ensemble de choix entre itinéraires émerge une problématique d'hétérogénéité inobservables des préférences. Conditionnellement à un ensemble de variables explicatives, une partie de chacun des processus décisionnels reste non quantifiable, et doit être considérée comme aléatoire par le modélisateur. Nous supposons que l'utilité totale de chacun des individus peut être décomposée comme dans l'équation (5.3). De fait, les conditions additionnelles (11) et (12) sur les préférences de chacun des décideurs sont supposées satisfaites.

Nous concevons les contrats de transport comme des paniers composés de déterminants certains et risqués observables, et de composantes inobservables résultant d'interactions entre l'individu et son environnement de choix. Nous supposons que le manque d'observabilité ne concerne pas les distributions de la variable risquée temps, afin d'éviter toute confusion entre incertitude relative à l'environnement de choix et inobservabilité statistique. Les distributions objectives étant parfaitement connue par toute la population de décideurs, elles le seront aussi pour l'observateur.

Condition 13 *La composante aléatoire de l'utilité pour un contrat de transport ne dépend que des caractéristiques certaines observables (c, x, S_n) .*

En reprenant notre formulation de l'utilité définie dans l'équation (5.3), l'utilité totale d'un décideur pour un contrat dont les caractéristiques observables sont (c, x, \mathcal{L}) est

$$W_{S_n}(c, x, \mathcal{L}) = \bar{v}(c, x, S_n) + \alpha \sum_{k=1}^K \left(\left(\sum_{j=1}^k p_j \right)^\lambda - \left(\sum_{j=1}^{k-1} p_j \right)^\lambda \right) \frac{t_k^\mu - 1}{\mu} + \varepsilon(c, x, S_n), \quad (5.16)$$

où $\bar{v}(x, c, S_n)$ est la part observable de l'utilité associée à la consommation d'attributs certains par un individu de caractéristiques S et $\varepsilon(c, x, S_n)$ la part aléatoire de l'utilité totale de l'individu.

Probabilités de choix.

Empiriquement, nous ne disposons que des réponses effectives des décideurs d'un échantillon observé. Nous n'observons que les décisions effectives de chacun des individus. Pour chacun des décideurs, nous supposons l'axiome des préférences révélées satisfait dans le cadre EUDR : si l'individu choisit un contrat de transport particulier, alors il s'agit de celui qui lui permet d'obtenir le niveau d'utilité espérée dépendante du rang le plus élevé.

Lorsque nous tirons un individu dans la population \mathcal{P} , nous ne pouvons prévoir avec probabilité égale à 1 sa réponse à la problématique de choix représentée par un ensemble de variables observables décrivant M contrats de transport, noté $\{(x_m, c_m, \mathcal{L}_m)\}_{m=1, \dots, M}$. Cependant, le choix observé pour chacun des décideurs résulte par hypothèse d'un comportement de maximisation de l'utilité EUDR. La probabilité d'observer un contrat de transport donné pour choix parmi un ensemble connu en tirant un individu n de caractéristique observables S_n dans la population est définie comme la probabilité de voir ce contrat maximiser le niveau d'utilité EUDR pour l'individu de caractéristiques S_n .

Definition 4 *La probabilité d'observer un choix m pour réponse en tirant un individu n de caractéristiques S_n dans la population, notée $\Pr_{n,m}$, est définie par la probabilité d'échantillonner un individu de caractéristiques S_n qui maximise son niveau total d'utilité pour ce choix :*

$$\forall m = 1, \dots, M, \Pr_{n,m} = \Pr(W_{S_n}(x_m, c_m, \mathcal{L}_m) \geq W_{S_n}(x_j, c_j, \mathcal{L}_j), \forall j \neq m). \quad (5.17)$$

$\forall m = 1, \dots, M$, $W_{S_n}(x_m, c_m, \mathcal{L}_m)$ est une variable aléatoire continue. La fonction de répartition du vecteur de variables aléatoires $(W_{S_n}(x_1, c_1, \mathcal{L}_1), \dots, W_{S_n}(x_M, c_M, \mathcal{L}_M))^t$ étant continue,

$$\Pr(W(S_n, x_m, c_m, \mathcal{L}_m) = W(S_n, x_j, c_j, \mathcal{L}_j), \forall l \neq m) \stackrel{ps}{=} 0. \quad (5.18)$$

La probabilité d'échantillonner un individu indifférent entre deux loteries est nulle presque partout. La probabilité d'échantillonner un individu n'ayant qu'une unique loterie maximisant son niveau d'utilité est égale à 1 presque partout.

5.3.2 Présentation des données.

Ensemble de choix.

Nous nous limiterons ici au choix d'un itinéraire sur le corridor OD Paris-Londres pour un ensemble de voyageurs participant au programme de fidélisation de la compagnie aérienne Air France, et se déplaçant sur le corridor origine-destination (OD) Paris-Londres. Nous nous focalisons sur les voyageurs réguliers sur ce corridor, ceux qui effectuent au moins un trajet OD hebdomadaire et dont le retour associé au voyage aller se fait au cours de la même journée : 756 individus sont échantillonnés. Cette stratification nous permet aussi de penser que le motif d'un déplacement est professionnel.

Deux vols sont considérés : le premier effectue un trajet de allant de Paris, aéroport de Roissy-Charles-de-Gaulle terminal 2 (CDG2), à Londres, aéroport de Heathrow (LHR) ; le second vol part de Paris CDG2, pour se poser à Londres, aéroport de la City (LCY). Si la première destination est un aéroport d'envergure internationale, il est géographiquement excentré des principaux centres d'affaires de la zone urbaine londonienne. L'aéroport de la City, comme son nom l'indique, est situé à proximité des principaux quartiers d'affaires. Il est cependant de plus petite capacité (il ne peut supporter tous les types appareils à l'atterrissage et au décollage), et plus cher d'accès. En fait, CDG2-LHR est un itinéraire où les tarifs sont plus attractifs, mais imposant un coût d'accès en temps supplémentaires vers les zones d'affaires.

Les deux vols utilisés par nos voyageurs sélectionnés sont pour CDG2-LHR le vol numéro AF1170, programmé partant à 08H00 et arrivant à 08H25 heure locale (il y

a une heure de décalage horaire entre Paris et Londres), et pour CDG2-LCY le vol numéro AF5018, programmé partant à 08H35 et arrivant à 08H40 heure locale. Le différentiel défini par les horaires à l'arrivée est suffisamment faible pour que nous puissions considérer que ces vols soient comparables. Ils sont programmés à l'arrivée dans la même tranche horaire, et si CDG2-LHR arrive plus tôt, il reste encore à accéder à la destination finale, étape plus coûteuse en temps qu'à l'arrivée à LCY lorsque nous considérons pour référentiel les principaux quartier d'affaires de la zone urbaine londonienne, situé à proximité de ce dernier.

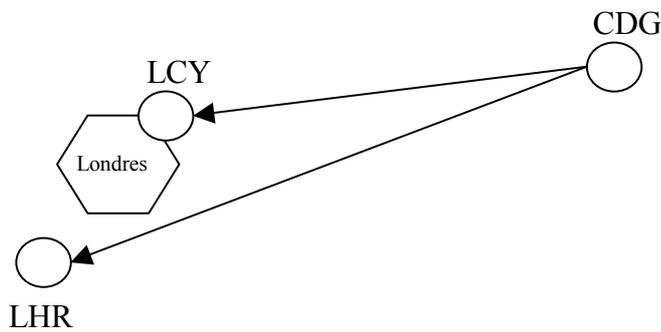


FIG. 5-2 – Représentation des itinéraires Paris-Londres.

Données statistiques.

L'information statistique dont nous disposons est riche mais circonscrite aux attributs tarifaires et technologiques des déplacements. Nous disposons d'une base de données des coupons de vol. Il s'agit des enregistrements des tickets de vol des passagers aux dates et sur les vols qu'ils ont utilisé pour leurs déplacements. Chaque enregistrement fournit le numéro d'identifiant associé au programme de fidélisation du passager, son code postal et sa ville, la date du vol, sa date de réservation, son numéro, son origine (aéroport de départ) et sa destination (aéroport d'arrivée), et la programmation horaire proposé par la compagnie. Une autre base de données retrace l'historique des horaires programmés et des horaires réalisés pour les vols auxquels nous nous intéressons. C'est à partir de celle-ci que nous pouvons extraire les distributions des durées des vols à chaque date t .

Les attributs tarifaires des contrats de vols sont extraits directement de la grille de tarifs de la compagnie. L'hétérogénéité des classes tarifaires cause un problème

dans la construction des variables prix associées à chaque contrat pour chaque individu échantillonné. Dans la reconstitution des tarifs des contrats non choisis par les individus, nous formulons l'hypothèse selon laquelle il consomme la même classe tarifaire sur les vols qu'ils n'utilisent pas. Trois classes tarifaires existent : première, affaires, économique. Selon les vols, ces tarifs diffèrent sensiblement. Pour le vol choisi par l'individu, nous disposons du prix effectivement payé. Pour le vol qu'il ne choisit pas, nous supposons l'invariance du choix de la classe tarifaire quel que soit le niveau du prix du trajet.

Génération des distributions objectives.

Précisons que le voyageur ne programme pas nécessairement son déplacement la veille de son départ : les distributions des durées des vols qu'il considèrent auront pour dernière date d'observation celle de la veille du jour de réservation du vol.

Condition 14 *Le voyageur se sert des distributions des temps de vols passés pour effectuer son choix.*

Cette condition impose au voyageur de s'informer sur ces distributions avant d'effectuer leur réservation. Pour nos passagers échantillonnés, effectuant au moins un déplacement par semaine, nous pensons que cette hypothèse est raisonnable. Les distributions objectives des durées des vols sont construites en retraçant l'historique des temps effectifs du début de la période d'existence de la grille jusqu'à la veille de la date de réservation. Le support des distributions est l'intervalle $[50, 150]$ pour lequel nous considérons tous les incréments de 1 minute. Nous notons $\mathbf{p}_{n,m}$ le vecteur de probabilités associé à la distribution objective du contrat risqué m à laquelle fait face l'individu n lorsqu'il doit effectuer son choix. Compte tenu de la définition de ces distributions individuelles objectives, deux individus réservant leur billet de vol le même jour ont même ensemble d'information concernant les distributions des temps de vols. Dans notre base de coupons, les voyageurs n'effectuent pas leurs déplacements le même jour. Nous disposons de plusieurs dates d'enregistrement générant variabilité dans les distributions individuelles de trajet. Rappelons que la grille d'offre proposée par la compagnie ne reste pas totalement stationnaire au cours du temps. En fait, on distingue la programmation hiver de la programmation été. Pour notre cadre, nous considérons la grille couvrant la période janvier-juin 2002.

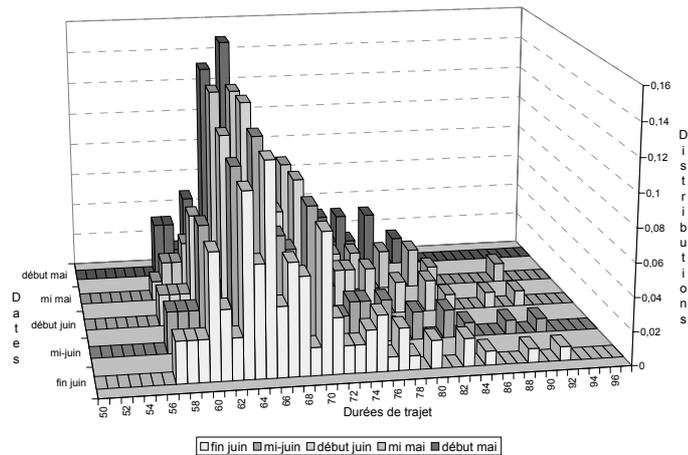


FIG. 5-3 – Evolution de la distribution des temps de trajet : vol CDG-LCY

Forme fonctionnelle, modèle paramétrique, identification et estimation.

Nous précisons ici les restrictions supplémentaires de notre cadre d'échantillonnage utilisées pour la définition d'un modèle empirique paramétrique.

Condition 15 *Tous les individus transforment les distributions de probabilité de façon identique.*

A titre de première approximation, nous admettons que tous les individus ont même fonction de transformation des distributions de probabilité. Nous pourrions penser que chaque individus construit sa propre façon de transformer les distributions de probabilité. Nous adoptons une formulation plus générique, où cette transformation est homogène par type de voyageurs, ici ceux qui se déplacent régulièrement pour motifs professionnels sur le réseau Air France CDG-LHR, CDG-LCY, arrivant à destination dans la fenêtre horaire 08H25-08H45. Nous rappelons qu'ils ont le choix entre deux vols au départ de CDG, chacun sur un des corridors aériens.

Condition 16 *La fonction de coût du temps de transport dans le certain est la même pour tous les individus de la population.*

Nous supposons aussi qu'il perçoivent de façon identique le coût induit par une allocation certaine de temps de transport.

Condition 17 *Les goûts du voyageur pour les attributs prix et temps sont indépendants de ses caractéristiques.*

Nous supposons notre échantillon suffisamment homogène pour considérer que les individus le constituant considèrent avec la même importance les variables entrant dans la valorisation de leur niveau d'utilité. Ces poids sont aussi indépendants des contrats de transport : le montant des ressources budgétaires et temporelles allouées au déplacement est perçu de la même façon quel que soit le contrat auquel il est consacré.

Condition 18 *Les distributions des composantes inobservables sont inconditionnelles aux variables explicatives observables.*

A l'état de développement expérimental, notre modèle est paramétré de façon à simplifier sa mise en pratique. Nous n'explicitons pas toutes les corrélations inobservables pouvant exister entre les loteries. Nous adoptons une spécification standard mais limitée dans la définition de la distribution des inobservables, permettant d'aboutir à la représentation Logit de nos probabilités de choix. Notre processus générateur des données est défini $\forall n = 1, \dots, N, \forall m = 1, \dots, M$, par l'expression suivante :

$$\begin{aligned}
 W_{S_n}(x_m, c_m, \mathcal{L}_m) &= v_m + \beta c_{nm} \\
 &+ \alpha \sum_{k=1}^K \left(\left(\sum_{j=1}^k p_{n,mj} \right)^\lambda - \left(\sum_{j=1}^{k-1} p_{n,mj} \right)^\lambda \right) \frac{t_k^\mu - 1}{\mu} + \varepsilon_{nm}, \quad (5.19) \\
 \varepsilon_{nm} &\stackrel{iid}{\rightarrow} \text{loi } F(\varepsilon_{nm}) = e^{-e^{-\frac{\varepsilon_{nm}}{\sigma}}}, \sigma > 0
 \end{aligned}$$

où α, λ, μ ont même interprétation que dans le cas général, où β est le poids du coût de transport c_{nm} pour l'itinéraire m et où v_m est un niveau d'utilité constant propre à chaque contrat, synthétisant l'ensemble des déterminants certains non considérés dans cette spécification. σ est un paramètre de dispersion de la partie aléatoire de l'utilité.

Le codage des réponses observées est une variable indicatrice signifiant ou non le choix effectif d'un contrat de vol m . Par construction, lorsqu'une loterie est choisie, toutes les autres ne le sont pas. Les choix sont mutuellement exclusifs, et $\forall n = 1, \dots, N, \forall m = 1, \dots, M$,

$$y_{nm} = \begin{cases} 1 & \text{si } W(S_n, x_m, c_m, \mathcal{L}_m) > W(S_n, x_j, c_j, \mathcal{L}_j), \forall j \neq m \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \quad (5.20)$$

Les probabilités de choix se déduisent de la relation structurelle les définissant comme des rectangles de probabilités sur l'ensemble des différences de niveaux d'utilité⁶ :

$$\Pr_{n,m} = \Pr(y_{nm} = 1 | S_n, x_m, c_m, \mathcal{L}_m; \theta) = \frac{e^{\frac{v_m + \beta c_{nm} + \alpha \sum_{k=1}^K \left(\left(\sum_{j=1}^{k+1} p_{n,m,j} \right)^\lambda - \left(\sum_{j=1}^k p_{n,m,j} \right)^\lambda \right) \frac{t_k^\mu - 1}{\mu}}}{\sum_{l=1}^M e^{\frac{v_l + \beta c_{nl} + \alpha \sum_{k=1}^K \left(\left(\sum_{j=1}^{k+1} p_{n,l,j} \right)^\lambda - \left(\sum_{j=1}^k p_{n,l,j} \right)^\lambda \right) \frac{t_k^\mu - 1}{\mu}}}}. \quad (5.21)$$

où θ est le vecteur des paramètres estimables du modèle, c'est-à-dire $\lambda, \mu, \frac{\alpha}{\sigma}, \frac{\beta}{\sigma}, \frac{v_1}{\sigma}, \dots, \frac{v_M}{\sigma}$. Les constantes propres à chaque alternative ne sont pas identifiables sans restriction supplémentaire. Ce sont les différences entre ces niveaux constants qui sont estimables : nous choisissons une loterie m^* pour référence, pour laquelle $v_{m^*} = 0$, de telle façon que les autres niveaux constants soient estimables relativement à ce premier. De même, les paramètres $\alpha, \beta, v_1, \dots, v_M$ ne sont pas identifiables. Seuls leurs ratios avec le paramètre σ est estimable.

La fonction de log-vraisemblance de l'échantillon s'écrit avec nos notations

$$\ln \ell \left(y | S, \{x_m, c_m, \mathcal{L}_m\}_{m=1, \dots, M}; \theta \right) = \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M y_{nm} \ln \left(\Pr(y_{nm} = 1 | S_n, x_m, c_m, \mathcal{L}_m; \theta) \right). \quad (5.22)$$

Nous cherchons la valeur de θ qui maximise cet expression. L'estimateur du maximum de vraisemblance (MV) est défini par la solution du programme de maximisation suivant⁷ :

$$\hat{\theta}_{MV} = \arg \max_{\theta} \left(\ln \ell \left(y | S, \{x_m, c_m, \mathcal{L}_m\}_{m=1, \dots, M}; \theta \right) \right).$$

⁶Nous renvoyons le lecteur au chapitre 3 pour une présentation du calcul associé à ce résultat.

⁷La maximisation de la fonction est non linéaire et fait appel pour notre application à une combinaison d'algorithmes d'optimisation : Newton-Raphson et Berndt, Hall, Hall, et Hausman. Au point de convergence, l'élasticité de la fonction de log-vraisemblance relativement à une variation de l'un des paramètres est inférieure à 10^{-4} , et le maximum numérique des gradients en ce point est inférieur à 10^{-4} . L'optimisation est effectuée plusieurs fois en changeant le vecteur des valeurs initiales, et conduit à chaque fois vers la même zone de convergence pour les valeurs des paramètres.

Ses propriétés sont présentés dans Newey et McFadden(1994), Gourieroux et Montfort(1989). Nous obtenons des estimations asymptotiquement sans biais et convergentes de nos paramètres identifiant le modèle.

5.3.3 Résultats et commentaires.

Le modèle estimé exhibe optimisme et faible aversion au risque de perte en temps de transport. Nous pensons que ce résultat est étroitement lié à l'existence d'habitudes chez les passagers fidèles de la compagnie. Les résultats numériques sont présentés dans le tableau suivant :

Modèle EUDR Box-Cox Logit			
	<i>Loteries</i>	<i>Fréquences observées</i>	
	<i>Vol CDG2-CLY [1]</i>	<i>46.96%</i>	
	<i>Vol CDG2-LHR [2]</i>	<i>53.04%</i>	
Variabes explicatives (apparaissant pour les modes numérotés)	Paramètres	Student	
Constante [2]	-0.8139	-3.0809	
Poids de la représentation EUDR [1] [2]	-0.0227	-4.0669	
Prix du trajet [1] [2]	-0.1156	-5.4665	
Paramètre de transformation des distributions	0.5387	1.7578	
Paramètre de Box-Cox	0.9844	1.8244	
Statistiques d'ajustement			
Taille de l'échantillon		756	
Log-vraisemblance constante seule		-522.6189	
Log-vraisemblance au point de convergence		-266.8949	
Statistique du rapport de vraisemblance [degrés de liberté]		511.448 [4]	
Ratio de vraisemblance de McFadden		48.93%	

TAB. 5.1 – Estimations des paramètres du modèle.

Le paramètre associé à la différence des niveaux d'utilité de réservation de chaque vol, la constante $v_{LHR} - v_{LCY}$, est statistiquement significative. Jusqu'à un seuil de risque de première espèce égal à 1%, le calcul de la statistique de Student conduit à rejeter l'hypothèse de nullité du coefficient. Sa valeur numérique n'a aucun sens, voir par exemple Maddala(1983), et signifie simplement qu'une partie des variables non observées ont un impact non nul. L'explication tient à la proximité des zones d'affaires, un encadrement aux passagers plus entretenu pour la destination LCY : il s'agit d'un aéroport spécialement développé pour les passagers se déplaçant pour motifs professionnels. L'accessibilité à cet aéroport est aussi facilitée par un ensemble de services de transport plus développé que pour l'aéroport LHR. A durées de vols et prix identiques, la probabilité de choisir l'aéroport LHR diminue.

Les paramètres pondérant le prix du trajet, β , et l'effet du temps sur le niveau d'utilité total α , caractérise l'importance des attributs tarifaires et technologiques du contrat de vol. Leurs signes sont négatifs, en accord avec les hypothèses théoriques de notre modèle : plus le coût et/ou la durée augmente, plus l'utilité y étant associée diminue, toutes choses égales par ailleurs. β représente l'effet marginal sur l'utilité totale d'une variation du coût monétaire du trajet. Il s'agit de la désutilité marginale liée à une augmentation marginale du coût de transport. Son signe est négatif, en accord avec la définition d'une fonction de coût, et jusqu'à un seuil de risque de première espèce égal à 1%, nous rejetons l'hypothèse de nullité du coefficient. L'influence significative du coût du trajet dans le choix d'un itinéraire est naturel. Il s'agit pour l'individu d'une allocation budgétaire grevant ses ressources monétaires avec lesquelles il peut consommer d'autres activités plus utiles ou lucratives que celle de transport entre deux aéroports. Toutes choses égales par ailleurs, il préfère voyager sur l'itinéraire le moins cher.

L'effet du montant perçu de temps de transport α est négatif et significatif à un seuil de risque de 1%. Quelle que soit la durée effective, l'allocation de temps au transport est désutile. Le ratio $\frac{\alpha}{\beta}$ représente la valeur monétaire du glissement marginal vers la gauche de son support d'une distribution des temps de trajet. Cette valeur est invariante avec la loterie et représente la valeur monétaire que l'individu est prêt à payer pour voir diminuer avec certitude son temps de parcours quelle que soit la durée effective. Pour notre application, nous trouvons une valeur de 0.1964€ par minute.

La fonction de coût du temps de transport dans le certain est linéaire. Notre estimation du paramètre μ de la transformation de Box-Cox, qui mesure la perception du temps dans le certain, est significative à un seuil de risque égal à 10%. Nous ne rejetons pas l'hypothèse d'unité de ce paramètre : la statistique de Student correspondante est égale à $T_\mu = -0.0289$, et ne permet pas de rejeter $\mu = 1$ au seuil de 10%.

La valeur numérique du paramètre de transformation d'une distribution λ , témoignant des croyances en la chance du voyageur, valide conjointement avec le résultat précédent le cadre ou optimisme et faible aversion au risque prévalent. Avec $\lambda < 1$, la fonction de transformation des probabilité est concave, et l'individu a tendance à favoriser les événements les plus favorables⁸. Conjointement, $\mu = 1$ et $\lambda < 1$ valide le

⁸Nous rappelons que la fonction de répartition est construite sur le support des pertes de temps, ordonné de la moins défavorable à la plus défavorable.

résultat théorique de Yaari(1987) : l'individu est faiblement averse au risque de perte en temps de transport. Nous soulignons que la fonction de coût dans le certain est linéaire. Relativement au cadre EU, où le coût dans le certain doit être convexe pour caractériser l'aversion au risque de l'individu, c'est ici la fonction de transformation des probabilités qui joue ce rôle.

Dans notre cadre, le passager préfère l'espérance de la loterie à la loterie elle-même. En d'autres termes, toutes choses égales par ailleurs, l'individu préfère être sûr d'allouer le temps moyen de vol que de prendre le risque de voir la durée du vol s'autodéterminer par une réalisation de la loterie, plus favorable ou non à la durée espérée. A ce titre, nous présentons l'évolution au cours du temps de la valeur de l'équivalent certain. Conjointement à une augmentation du temps moyen du trajet, elle diminue. L'évolution de la distribution des temps de trajet permet de mieux comprendre ce résultat. D'une part, le temps moyen du trajet s'accroissant au cours du temps, le coût perçu augmente, toutes choses égales par ailleurs. Pour une distribution des temps de parcours donnée, la différence entre les niveaux d'utilité diminue et le prix qu'est prêt à payer l'individu pour se certifier le temps moyen de parcours diminue. Cette relation inverse est particulièrement marquée au début de la période où la grille d'offre est établie. Le fait que cette prime de couverture diminue même lorsque le temps moyen de trajet se stabilise s'explique simplement par un accroissement des probabilités des réalisations favorables au cours du temps (voir le graphique de l'évolution des distributions des temps de parcours pour l'itinéraire CDG2-LCY).

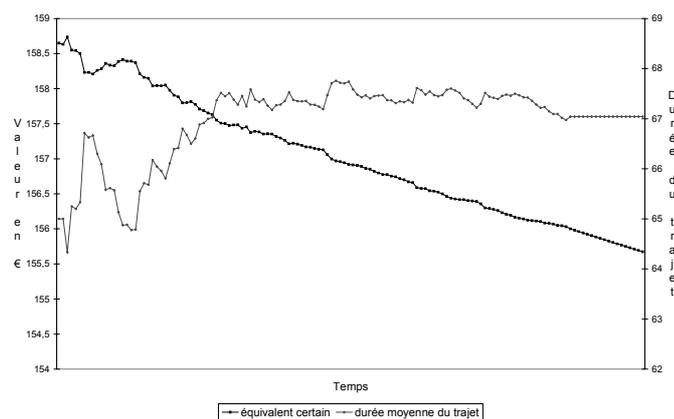


FIG. 5-4 – Evolution de la valeur de l'équivalent certain, vol CDG-LCY.

Remarquons que la valeur de l'équivalent certain relativement au temps programmé⁹ du trajet a tendance augmenter au cours de la période d'existence de la grille offerte. L'interprétation est simple : l'augmentation du temps moyen de trajet signifie une augmentation des masses de probabilité associées aux événements défavorables. Pour l'itinéraire CDG2-LCY la durée programmée étant de 65 minutes, nous observons l'accroissement du risque de perte en temps et une augmentation de la propension à payer pour se couvrir contre celui-ci.

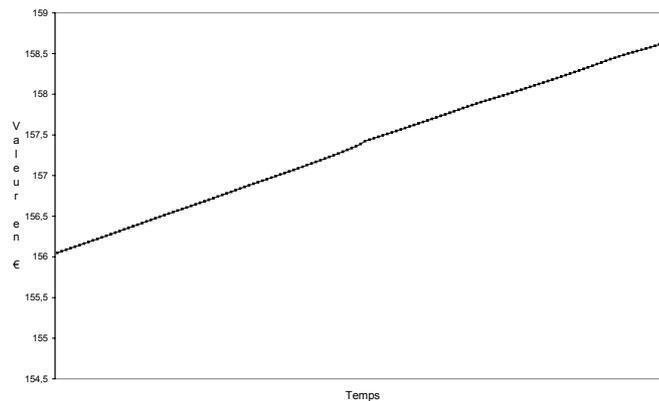


FIG. 5-5 – Durée de vol programmée : évolution de la prime de couverture complète

Les capacités prédictives du modèle sont à relativiser, avec une nette propension à surestimer la probabilité de choisir l'itinéraire CDG2-LCY. Le tableau ci-dessous¹⁰ précise les écarts existant entre ce qui est observé et ce que le modèle permet de reproduire. Nous pensons cette capacité prédictive limitée par le manque de richesse et diversité de l'information statistique utile à la description du comportement de choix.

⁹Nous entendons par temps programmé la durée théorique annoncée par la compagnie sur le coupon de vol du voyageur.

¹⁰Nous renvoyons le lecteur aux travaux de McFadden(1973) pour une explication détaillée de la construction de la table de prédiction du succès.

Box-Cox Conditional Logit model					
Loteries		Choix prédits		Effectifs observés	Fréquence observée
		CDG2-LCY	CDG2-LHR		
Choix effectifs	CDG2-LCY	350	5	355	0.4696
	CDG2-LHR	121	280	401	0.5304
Effectifs prévus		471	285	756	1
Part prévue		0.6230	0.3770	1	
Proportion prévue avec success		0.7431	0.9825		
Indice de prediction du success		0.1201	0.6055		
Erreur proportionnelle dans la part prévue		0.1534	-0.1534		

TAB. 5.2 – Table de prédiction des choix avec le modèle ajusté

Conclusion : limites et extensions.

Nous n'avons pas vraiment discuté de la portée pratique de ce type de modèle, notamment les extensions qu'il permet dans l'approche standard de l'analyse de la demande individuelle de transport. Raisonnablement, le choix d'un horaire de déplacement peut être aussi partiellement conditionné par les accroissements de risque présents à certains point de l'horloge du cycle considéré. Durant les heures de pointes peuvent se chevaucher plusieurs créneaux d'entrée sur le corridor OD. En d'autres termes, il peut coexister de façon rapprochée dans le temps plusieurs vols. Lorsque, pour une longueur de cycle donnée la fréquence d'offre de voyages OD augmente, la diversité des horaires accessibles s'accroît. Est alors induit chez le passager un mécanisme d'arbitrage entre ceux-ci afin de choisir le plus adapté selon ses desiderata. Un élément central de ce choix est de nature organisationnelle et propre à l'individu, s'agissant de l'horaire auquel il souhaite arriver. En reprenant à nouveau les propos de Vickrey(1969), Small(1982, 1992), mais aussi dePalma et Marshall(1996,1998), dePalma et Fontan(1999,2001), c'est parce qu'il existe un horaire cible déterminant le début d'une activité à destination, et caractérisant une contrainte organisationnelle temporelle devant être respectée, qu'il existe un arbitrage concernant l'heure à laquelle il est nécessaire de se déplacer pour réaliser dans l'espace et le temps ce qui a été prévu. Lorsque l'individu est libre d'entrer et sortir d'un réseau de transport à tout moment, ce sont les contraintes de capacité d'absorption des flux de voyageurs qui vont déterminer l'existence de congestion, et de fait, l'allongement des temps de trajet. Dans ce cas, représentant particulièrement bien le réseau routier, le voyageur doit anticiper cette congestion et adapter ses horaires de déplacement. Lorsque les réseaux ne sont pas libres d'utilisation, le problème est immédiat, puisqu'il n'existe

pas nécessairement l'horaire de départ "optimal" pour le voyageur : la diversité et l'hétérogénéité des goûts et calendriers des voyageurs ne permettent pas aux opérateurs de transport de pratiquer la différenciation des services offerts au premier degré. Dans notre contexte, la durée du trajet ne peut être parfaitement prévue. De fait, même si la programmation du vol permet de faire correspondre la réalité avec l'horaire cible à destination, il ne peut être prévu avec certitude que ce programme sera réalisé dans les termes exacts du contrat. Ce caractère incertain peut à lui seul faire basculer le choix de l'horaire du vol du passager. A l'extrême, il peut être souhaitable de prendre un vol assurant un horaire d'arrivée différent de celui qui est désiré, mais avec plus de "certitude" concernant sa réalisation, qu'un vol dont la programmation respecte le calendrier théorique du voyageur, mais dont la réalisation effective est fortement variable, c'est-à-dire dont la distribution des temps de vols est fortement dispersée, caractérisant ainsi l'irrégularité de la programmation offerte. Etudier le risque de perte en temps de transport pour une grille d'offre donnée, c'est aussi étudier la fiabilité et la régularité de cette dernière. S'il semble naturel, en tant qu'opérateur de transport, de chercher à offrir le service le plus régulier et stable possible, il n'est pour autant pas assuré que ce soit le cas. A ce titre, nous notons un ensemble de sources engendrant la perturbation des programmes offerts : le taux de rotation des appareils de la flotte ; les procédures liées à l'entretien, la révision, et la préparation des appareils ; les procédures d'embarquement et débarquement ; le chevauchement des procédures de vol, etc....

Cette dernière remarque suggère aussi que le risque de perte en temps intervient aussi au niveau du choix d'un opérateur de transport. S'il peut y avoir multiplicité des itinéraires et horaires pour un opérateur donné, il peut aussi y avoir multiplicité des opérateurs sur les itinéraires et tranches horaires. Potentiellement, sur corridor OD coexistent plusieurs compagnies de transport de passagers, chacune pouvant offrir plusieurs itinéraires à plusieurs horaires (un même itinéraire pouvant aussi avoir lieu à plusieurs horaires). La perception du risque de perte en temps intervient dans toutes dimension de la demande individuelle de transport à court terme : choix d'un mode (d'une compagnie), choix d'un itinéraire, choix d'un horaire. Dans le choix d'une compagnie n'intervient pas seulement les caractéristiques d'un vol et d'un itinéraire précis, mais de toute la grille d'offre sur le corridor OD. L'idée est simple et associée partiellement à la notion d'image de marque de l'opérateur : c'est en faisant preuve de régularité et fiabilité sur l'ensemble de son offre qu'il pourra asseoir sa réputation de service assurant le respect de la demande émise

par le voyageur. En d'autres termes, l'impact (a priori positif) sur le bien-être des passagers des vols dont les distributions sont peu dispersées est compensé par celui des vols peu réguliers dans leur réalisation au cours du temps.

Conclusion générale.

Parmi les nombreux facteurs qui composent la demande de transport, exposés au cours du premier chapitre, conçue comme la résultante d'un calendrier d'activités définies dans l'espace et le temps, lui-même conditionnel à des choix de localisations résidentiels, nous avons choisi de nous intéresser principalement à deux de ses composantes : le choix du mode de transport et le choix d'itinéraires. Nous nous sommes placés dans le cadre d'analyse de la demande de transport pour l'étude d'un déplacement régulier pour un motif professionnel : déplacements domicile-travail pour le choix du mode de transport, et déplacements aériens réguliers sur le corridor Paris-Londres. Nous avons supposé que les autres choix étaient prédéterminés, optimaux et invariants. Nous avons exclu de fait toutes les interactions spatiales et temporelles entre les différentes activités et leurs influences sur la réorganisation de toute la demande de transport du consommateur suite à une modification de l'offre de transport. Nous avons raisonné à demande de mobilité constante pour le déplacement régulier professionnel, et nous avons supposé que la modification de l'équilibre du consommateur en terme de consommation, loisir, et mobilité passait par un réajustement de la demande de mobilité associée aux autres motifs.

Les modèles statistiques que nous avons utilisé sont des modèles paramétriques au second ordre. Ils sont déduits d'une approche probabilisée de la maximisation de l'utilité. Le postulat est que la probabilité de choisir une alternative de transport est égale à la probabilité qu'il s'agisse de celle qui fournit le niveau d'utilité maximal. Les niveaux d'utilité associé à chaque modalité génère la décision observée par le modélisateur, qui les conçoit comme un vecteur de variables aléatoires latentes.

Dans le cadre d'analyse des déplacements domicile-travail, l'environnement de choix est à information parfaite : il n'existe aucune incertitude sur les attributs de transport consommés. Pour un échantillon de résidents dans la région Ile-de-France, nos résultats soulignent l'importance de déterminants de différents types

sur le choix entre le mode véhicule particulier et le mode transports en commun : socio-économiques (âge, revenu, capital automobile), géographiques (localisations résidentielles et accessibilité au lieu de travail), et propres à l'offre de transport (prix, temps). Les effets totaux sur l'utilité d'une augmentation du coût ou du temps du trajet sont négatifs, en accord avec l'intuition et les hypothèses théoriques de notre modèle. L'effet total d'une augmentation de la richesse favorise l'utilisation des transports en commun pour des déplacements à l'intérieur de Paris, sinon il favorise l'utilisation d'un véhicule particulier. Les estimations des valeurs du temps de transport sont conformes aux valeurs retenues par les institutions publiques et opérateurs de transports de la région francilienne, autour de 10.5€. Nous soulignons qu'elles augmentent fortement dès que nous considérons l'existence d'un coût du temps de transport convexe. Ce résultat suggère une pression plus forte de la demande sur l'augmentation des capacités de circulation sur les réseaux. Dans ce contexte, la valeur du temps en résultant est une fonction croissante avec la durée du trajet et le coût d'ajustement de la demande de mobilité pour d'autres motifs que le travail suite à une augmentation du temps du trajet domicile-travail est plus important lorsque l'individu choisit de se déplacer en transports en commun.

La certitude environnementale dans laquelle l'individu prend ses décisions dans le cadre de la théorie classique du consommateur doit être remise en cause, dans la mesure où les temps de trajet ne peuvent être prévus avec certitude. La ponctualité, la régularité, la fiabilité d'une offre de transport, sont des causes dont l'intérêt ne cesse de grandir. Les phénomènes de grèves, les règles procédurales d'exploitation sont des causes certaines de l'appréciation de l'aisance que procure un mode de transport dans la mobilité qu'il permet. Un réseau où les dysfonctionnements sont fréquents implique une augmentation du risque de perte en temps : la propension à payer pour voir son temps de transport diminuer avec certitude augmente. En restant dans le cadre d'analyse de la demande par motif de déplacement, lorsque nous considérons cette incertitude sur les temps de trajet relativement à la réalisation d'un déplacement régulier professionnel aérien. Le cadre théorique de l'espérance d'utilité dépendante du rang est utilisé : nous supposons que l'individu connaît parfaitement les distributions des temps de trajet pour ses déplacements. Ils disposent de toute l'information utile et pertinente à la construction de ces distributions pour les différents contrats de transports parmi lesquels il choisit. L'individu transforme les fonctions de répartition de ces distributions sur le support ordonné de la plus petite à la plus grande perte de temps. Le sens de la transformation, concave ou

convexe, détermine l'optimisme ou le pessimisme de l'individu. Conjointement à la forme de la fonction de coût du temps de transport dans le certain, son aversion au risque est caractérisée. Dans le contexte d'un arbitrage entre coût et distribution de probabilité des temps du trajet, nous avons défini la prime de couverture contre le risque de perte en temps. Elle mesure le consentement à payer d'un individu pour accepter une nouvelle distribution à niveau d'utilité constant. Il s'agit d'une généralisation de la définition de la valeur du temps. Pour notre application à un échantillon de voyageurs réguliers d'une même compagnie sur un corridor constitué de deux itinéraires, optimisme et faible aversion au risque de perte de ressources en temps dans le transport sont les résultats de la description du comportement du passager. L'évolution de l'équivalent certain au cours du temps montre que le passager ressent une amélioration de la régularité de l'offre au cours du temps.

Nous pouvons envisager de nombreuses extensions pour mieux rendre compte des phénomènes observés. Nous distinguons deux voies complémentaires et l'extension des modèles économétrique qu'elles requièrent. La première consiste à considérer la demande de transport dans son ensemble, à savoir tous les facteurs qui la constitue : itinéraires et horaires (centraux dans la détermination des pics de congestion et leurs répartitions spatiales), destinations de l'ensemble des activités du calendrier et modes de transport à court terme, niveau de capital automobile et localisation résidentielle à long terme. Nous avons raisonné en supposant l'équilibre atteint pour les facteurs que nous n'avons pas étudié, selon différentes règles heuristiques restant à vérifier, n'ayant ainsi que le choix du mode de transport ou de l'itinéraire pour le motif professionnel à étudier. Un système de prévision de la demande de transport nécessite de les analyser plus précisément, notamment dans le but d'établir des politiques de gestion de la demande à court terme : orientation des flux, politiques de "congestion-pricing",....

La seconde extension repose sur notre approche fondée sur la séparation des déplacements par motif. En réalité, toutes les activités du calendrier de l'individu sont enchevêtrées. Il s'ensuit que la demande de déplacements pour l'une d'entre elle ne peut s'établir sans considérer son impact sur le reste de l'organisation du calendrier. La question de la hiérarchie et l'organisation des types d'activités se pose. Elle se joignent dans l'espace et le temps en recourant au marché des transport, et les choix initiaux ont des conséquences sur ceux qui sont faits par la suite. Ben-Akiva et Bowman(1998) proposent d'emboîter de façon cohérente plusieurs types de décision caractérisant l'organisation spatiale et calendaire d'un panier d'activités et

des déplacements associés. Les systèmes de prévision de la demande de transport fondés sur l'analyse d'un calendrier d'activités sont en plein essor.

Notre champ d'utilisation des modèles économétriques est adaptée à l'étude dans des ensembles de choix binaires, et ne caractérisent pas explicitement les problèmes d'endogénéité liés aux variables expliquant les choix de transport. Les derniers développements en la matière sont spectaculaires, et font preuve de synthèse sur les forces des modèles pionniers tout en proposant de rendre mieux compte de la simultanéité des décisions individuels conduisant à observer telle ou telle façon de se déplacer. En particulier, Bierlaire(1998) développe un modèle fondé sur la famille des lois extrêmes généralisées (GEV), où il considère un enchevêtrement de décisions, toutes corrélées les unes aux autres, et pour lesquelles les facteurs observables n'entrent pas nécessairement de façon linéaire dans l'évaluation de l'utilité que retire l'individu. McFadden(2003), Ben-Akiva, McFadden, Bolduc et al(1999,2001) et Walker et Ben-Akiva(2002) développent la classe des modèles de choix hybrides, où les variables proxy explicatives des choix observés sont endogénéisées. Les déterminants des choix (prix, temps, âge,...) que nous avons utilisé pour nos applications et commentaires sont tous objectifs et mesurables. Nous ne considérons pas explicitement les notions de confort, sécurité, et convenance d'utilisation d'un moyen de déplacement. Ils occupent une place de plus en plus importante dans les choix de transport, et explique la plupart du temps la désincitation à l'usage des réseaux de transports en commun. Dans ces propos, il faut comprendre que l'offre de transport ne se limite pas à une offre de technologie contre le paiement d'un coût. Dans la mesure où il s'agit d'une activité intermédiaire désutile en soi, le voyageur cherche à compenser cette perte de ressources rares par la consommation de "services et loisirs" associés de façon complémentaire au déplacement : sécurité, confort,

References

- Abdellaoui, M., 1995 , 'Comportements individuels devant le risque et transformation des probabilités', *Revue d'Economie Politique*, **105**, 157-178.
- Abraham, C. et J.D.Blanchet, 1973 , 'Le modèle prix-temps', *Revue de l'Aviation Civile*.
- Arduin, J.P., Ni, J. et O. Pick, 1994 , 'Valeur du Temps, log-normalité des revenus et choix modal', Communication à WC RR 1994 Paris.
- Arrow, K., 1965 , 'The theory of risk aversion, in Aspects of the Theory of Risk Bearing', Yrjo J. Saatio, ed., Helsinki.
- Becker, G.S., 1965 , 'A theory of the allocation of time', *The Economic Journal*, **75**, 493-517.
- Beesley, M., 1965 , 'The value of time spent travelling : some new evidence', *Economica*.
- Ben-Akiva, Walker, Bernardino, Gopinath, Morikawa, et Polydoropoulou, 2002. , 'Integration of Choice and Latent Variable Models', In Perpetual Motion : Travel Behaviour Research Opportunities and Application Challenges (Elsevier Science, Mahmassani, Ed.), Chapter 21, 431-470.
- Ben-Akiva, McFadden, Train, Walker, Bhat, Bierlaire, Bolduc al, 2001 , 'Hybrid Choice Models : Progress and Challenges', *Marketing Letters* **13(3)**, 163-175.
- Ben-Akiva, M., D. McFadden, T. Garling, D. Gopinath, J. Walker, D. Bolduc, al., 1999. , 'Extended Framework for Modeling Choice Behavior,' *Marketing Letters*, Vol. **10**, No. 3
- Ben-Akiva, M. et M. Bierlaire, 1999 'Discrete choice methods and their applications to short-term travel decisions', in R. Hall, ed., 'Handbook of Transportation Science', **23**, Kluwer.
- Ben-Akiva, Moshe E. et John L. Bowman, 1999 , 'Activity-based disaggregate travel demand model system with activity schedules', *Transportation Research Part A*, **35**, pages 1-28.
- Ben-Akiva, M. et J.L. Bowman, 1998 , 'Activity Based Travel Demand Model Systems,' in Equilibrium and Advanced Transportation Modeling, eds. P. Marcotte and S. Nguyen, Kluwer Academic Publishers
- Ben-Akiva, M., et J.L. Bowman, 1998 , 'Integration of an activity-based model system and a residential location model', *Urban Studies*, **35**.
- Ben-Akiva, M., et A. dePalma, 1996 , 'Activity based travel demand model systems', Communication at the 25th Anniversary of CRT, Montreal, October 1996.
- Ben-Akiva, M., J. L. Bowman, et D. Gopinath, 1996 , 'Travel Demand Model System for the Information Era,' *Transportation* **23**, 241-266.
- Ben-Akiva, Moshe et Denis Bolduc, 1991 , 'Multinomial Probit with Autoregressive Error Structure', Groupe de recherche en économie de l'énergie et des ressources naturelles, Cahier 91, 22-29.
- Ben-Akiva, M. et S.R. Lerman, 1985 , 'Discrete Choice Analysis : Theory and Application to Travel Demand', MIT Press, Cambridge, MA.

- Bhat, C., 2001 , 'Quasi-random maximum simulated likelihood estimation of the mixed multinomial logit model', *Transportation Research B*, **35**, 677-693.
- Bhat, C., 1998 , 'Accommodating flexible substitution patterns in multi-dimensional choice modeling : formulation and application to travel mode and departure time choice', *Transportation Research B*, **32**, 455-466.
- Bhat, C. 1998 , 'Analysis of Travel Mode and Departure Time Choice for Urban Shopping Trips'. *Transportation Research B*, **32**, 361-371.
- Bhat, C., 1997 , 'Incorporating observed and unobserved heterogeneity in urban work travel mode choice modeling', Working Paper, Department of Civil Engineering, University of Texas, Austin.
- Bhat, C., 1996 , 'Accommodating variations in responsiveness to level-of-service measures in travel mode choice modeling', Working Paper, Department of Civil and Environmental Engineering, University of Massachusetts, Amherst.
- Bhat, C., 1995 , 'A heteroscedastic extreme value model of intercity travel mode choice', *Transportation Research*, **29**, 471-483.
- Bierlaire, M., 1998 , 'Discrete choice models', in M. Labbé, G. Laporte, K. Tanczos and Ph. Toint, eds., 'Operations Research and Decision Aid Methodologies in Traffic and Transportation Management', NATO ASI Series, Series F : Computer and Systems Sciences, Springer Verlag, **166**, 203-227.
- Block, H. et J. Marshack, 'Random Orderings and Stochastic Theories of Response', in Olkin et al., eds., Contributions to Probability and Statistics, Stanford University Press, 97-132.
- Boiteux, M., 2001. , 'Transports : choix des investissements et coûts des nuisances', Rapport, Commissariat Général du Plan.
- Bolduc, D., 1999 , 'A Practical Technique to Estimate Multinomial Probit models in Transportation', *Transportation Research*, Part B, **33**, 63-79.
- Bolduc, D., Fortin B. et M.A. Fournier, 1996 , 'The Impact of Incentive Policies to Influence Practice Location of General Practitioners : A Multinomial Probit Analysis', *Journal of Labor Economics*, **14**, 703-732.
- Börsch-Supan, A. et V.A. Hajivassiliou, 1993 , 'Smooth unbiased multivariate probability simulators for maximum likelihood estimation of limited dependent variable models', *Journal of Econometrics*, **58**, 347-368.
- Bowman, John L., Mark A. Bradley, Yoram Shiftan, T. Keith Lawton et Moshe E. Ben-Akiva, 1998 , 'Demonstration of an activity based model system for Portland', 8th World Conference on Transport Research, July 12-17, Antwerp, Belgium.
- Bowman, John L., et Moshe E. Ben-Akiva , 1997 , 'Activity based travel forecasting, in Activity-Based', Travel Forecasting Conference, June 2-5, 1996 : Summary, Recommendations and Compendium of Papers, New Orleans, Louisiana. USDOT report #DOT-T-97-17, 32 pages.

- Box, G.P. et D.R. Cox, 1964 , 'An analysis of transformations', *Journal of the Royal Statistical Society B*, **26**, 211-243.
- Brownstone, D. et K. Train, 1999 , 'Forecasting new product penetration with flexible substitution patterns', *Journal of Econometrics*, **89**, 109-129.
- Bruzelius, N., 1979 , 'The value of travel time'. Croom Helm. Chapitres 2-6.
- Chateauneuf, A., 1999 , 'Comonotonicity axioms and RDEU theory for arbitrary consequences', *Journal of Mathematical Economics*, **32**, 21-45.
- Chateauneuf, A. et M. Cohen, 1994 , 'Risk seeking with diminishing marginal utility in a non-expected utility model', *Journal of Risk and Uncertainty*, **9**, 77-91. bgh
- Chew, S. et P. Wakker, 1996 , 'The comonotonic sure thing principle', *Journal of Risk and Uncertainty*, **12**, 5-27.
- Chew, S., Karni, E. et Z. Safra, 1987 , 'Risk aversion in the theory of expected utility with rank dependent preferences', *Journal of Economic Theory*, **42**, 370-381.
- Cohen, M. et J.M. Tallon, 2000 , 'Décisions dans le risque et l'incertain : l'apport des modèles non additifs', *Revue d'Economie Politique*, **110**, 631-681.
- Cohen, M., 1995 , 'Risk-aversion concepts in expected and non-expected utility models', *The Geneva Papers on Risk and Insurance Theory*, **20**, 73-91.
- de Lapparent, M., 2002 , 'Nonlinearities in the valuations of travel times at the individual level', Proceedings of the 19ème Journées de la Microéconomie Appliquée, Université de Rennes, France.
- de Lapparent, M., de Palma, A. et C. Fontan, 2002 , 'Nonlinearities in the valuations of time estimates', Proceedings of the European Transport Conference, 9-11 september 2002, Homerton College, Cambridge, UK.
- de Palma, A. et C. Fontan, 2001 , 'Choix modal et Valeur du temps en Ile-de-France', Working paper, Department of Economics, University of Cergy-Pontoise, France.
- de Palma, A. et K. Kilani, 1999 , 'Discrete choice models with income effects', Working paper n°9942, Department of Economics, University of Cergy-Pontoise, France.
- de Palma, A. et C. Fontan, 1999 , 'Enquête MADDIF : Multimotif Adaptée à la Dynamique des comportements de Déplacement en Ile-de-France', Projet DRAST/PREDIT 99MT20
- de Palma, A. et F. Marshall, 1998 , 'From W. Vickrey to large-scale dynamic traffic models', Proceedings of the 1998 European Transport Conference, Loughborough University.
- de Palma, A., Khattak, A.J. et Gupta, D., 1997 , 'Commuters' Departure Time Decisions in Brussels', *Transportations Research Record*. Washington.
- de Palma, A. et F. Marshall, 1996 , 'METROPOLIS, un outil de simulation du trafic urbain', *Revue Transports*, **378**, 204-215.
- de Palma, A. et Rochat, D., 1996 , 'Urban Congestion and Commuters' Behavior : the Departure Time Context'. *Revue d'Economie Régionale et Urbaine*, **3**, 467-488.

- de Serpa, A.C., 1971 , 'A theory of the economics of time', *The Economic Journal*, **81**, 828-846.
- Debreu, G., 1958 , 'Stochastic choice and cardinal utility', *Econometrica*, **26**, 440-444.
- Debreu, G., 1954 , 'Representation of a Preference Ordering by a Numerical Function', in Thrall, Davis et Coombs, eds., *Decision Processes*, Wiley.
- Domenich, T. et D. McFadden, 1975 , 'Urban Travel Demand : a behavioral analysis', North-Holland, Amsterdam.
- Falmagne, J.C., 1978 , 'A Representation Theorem for Finite Random Scale Systems', *Journal of Mathematical Psychology*, **18**, 52-72.
- Fishburn, P., 1998 , 'Stochastic Utility', in Barbara, Hammond et Seidl, eds., *Handbook of Utility Theory*, Kluwer, 273-320.
- Gaudry M.J.I., 1981 , 'The Inverse Power Transformation Logit and Dogit Mode Choice Models', *Transportation Research B*, **15**, 97-103.
- Gaudry M.J.I., 1978 , 'A Generalized Logit Mode Choice Model', Publication #98, Centre de recherche sur les transports, Université de Montréal.
- Gaudry M.J.I et Dagenais M.G, 1978 , 'A Generalized Dogit ModeChoice Model', Publication #107, Centre de recherche sur les transports, Université de Montréal.
- Geweke, J.F., Keane, M.P. et D.E. Runkle, 1997 , 'Statistical inference in the multinomial multiperiod probit model', *Journal of Econometrics*, **80**, 125-165.
- Geweke, J.F., 1989 , 'Efficient Simulation from the multivariate normal distribution subject to linear constraints and the evaluation of constraint probabilities', MIMÉO. Duke University, Durham, NC.
- Gourieroux, C. et A. Montfort, 1996 , 'Simulation Based Econometrics Methods', New York University Press.
- Gourieroux, C. et A. Montfort, 1989 , 'Statistiques et Modèles Econometriques', volume 2, *Economica*.
- Gourieroux, C., 1989 , 'Econométrie des Variables Qualitatives', *Economica*.
- Gronau, R., 1987 , 'Value of Time' in *The New Palgrave, A dictionary of Economics*. Eatweel, Milgate et Newman eds. volume 4, MacMillan, London.
- Gunn, H.F., Chen, Y.S. et Van de Vyvere, Y., 1996 , 'Estimation de la valeur marginale du temps de transport', *Recherche transports sécurité*, **52**, 45-57.
- Hajivassiliou, V.A., 2000 , 'Some practical issues in maximum simulated likelihood', in R.Mariano, M. Weeks and T. Schuerman, eds., *Simulation-Based Inference in Econometrics : Methods and Applications*, Cambridge University Press.
- Hajivassiliou, V.A. et D. McFadden, 1997 , 'The method of simulated scores for the estimation of LDV models', MIMÉO.

- Hajivassiliou, V.A., McFadden, D. et P. Ruud, 1996 , 'Simulation of multivariate normal rectangle probabilities and their derivatives : theoretical and computational results', *Journal of Econometrics*, **72**, 85-134.
- Hajivassiliou, V.A. et P.A. Ruud, 1994 , 'Classical estimation methods for LDV models using simulation', in R.F.Engle and D.McFadden, eds., 'Handbook of Econometrics', **4**, 2383-2441, North Holland, New York.
- Hajivassiliou, V.A., 1993 , 'Simulation estimation method for limited dependent variable models', *Handbook of Statistics*, **11**, 519-543.
- Halton, J., 1960 , 'On the efficiency of evaluating certain quasi-random sequences of points in evaluating multi-dimensional integrals', *Numerisch Mathematik*, **2**, 84-90.
- Hausman, J. et D. McFadden, 1984 , 'Specification tests for the multinomial logit model', *Econometrica*, **52**, 1219-1240.
- Hensher, D.A., 2001 , 'The valuation of commuter travel time savongs for car drivers in New Zealand : evaluating alternative model specifications', *Transportation*, **28**, 101-118.
- Hensher, D.A., 1994 , 'Stated preference analysis of travel choices', *Transportation*, **21**, 107-133.
- Hensher, D.A.,1989 , 'Behavioral and resource values of travel time savings : A Bicentennial update', *Australian road Research*, **19**, 223-229.
- Hensher, D.A., 1977 , 'Value of Business Travel Time', Pergamon Press Oxford.
- IAURIF, 1997 , 'Le modèle de trafic de l'IAURIF', Division Transports et Infrastructure.
- INSEE, 2000 , 'Automobile, carburants, réparations : 20 ans dévolution des prix', Insee Première, **713**.
- Jara-Diaz, S.R., 1990 , 'Consumer's Surplus and the Value of Travel Time Savings', *Transportation Research B*, **24**, 73-77.
- Jennings, A. et Sharp, C. 1976 , 'The Value of travel time savings and transport investment appraisal'. Oxford University Press. Modal choice and the value of travel time. 132-163.
- Joly I, Crozet Y, Bonnel P et C. Raux 2002 , 'La " Loi " de Zahavi, quelle pertinence pour comprendre la contraction ou la dilatation des espaces-temps de la ville?', Recherche pour le compte du Plan Urbanisme Construction Architecture, Pôle Sociétés Urbaines, Habitat et Territoires.
- Kahneman ; D. et A. Tversky, 1979 , 'Prospect theory : an analysis of decision under risk', *Econometrica*, **47**, 263-291.
- Keane, M.P., 1990 , 'A computationally practical simulation estimation estimator for panel data, with applications to estimating temporal dependence in employment and wages', MIMEO, University of Minnesota, Minneapolis MN.
- Koppelman, F. et M. Ben-Akiva, 1977 , 'Aggregate Forecasting with Disaggregate Travel Demand Models Using Normally Available Data', Proceedings of the World Conference on Transport Research, Rotterdam, The Netherlands.

- Koppelman, F., 1975 , 'Travel Prediction with Models of Individualistic Choice Behavior, Ph. D. dissertation, Department of Civil Engineering, MIT, Cambridge, Mass.
- Lancaster, K.J., 1966 , 'A new approach to consumer theory', *Journal of Political Economy*, **14**, 132-157.
- Layton, A.P., 1984 , 'The value of Commuter travel time savings, some clarifications'. *Journal of transport economics and policy*. volume 18, 199-201.
- Lee, N. et M.Q. Dalvi, 1969 , 'Variations in the value of travel time'. *Manchester school*, **37**, 313-336.
- Lerman, S. et C. Manski, 1981 , 'On the use of simulated frequencies to approximate choice probabilities', in C. Manski et D. McFadden, eds., *Structural Analysis of Discrete Data with Econometric Applications*, MIT Press, Cambridge, MA, 305-319.
- Liem, T.C, Dagenais M.G et M.J.I. Gaudry, 1993 , 'L-14 : A Program for Box-Cox Transformations in Regression Model with Heteroskedastic and Autoregressive Residuals', Publication #510, Centre de recherche sur les transports, Université de Montréal.
- Liem, T.C et M.J.I. Gaudry, 1987 , 'L-14 : PROBABILITY : the P-2 Program for the Standard and Generalized Box-Cox Logit Models with Disaggregate Data', Publication #527, Centre de recherche sur les transports, Université de Montréal.
- Lisco, T.E., 1967 , 'The Value of Commuters' Travel Time : A Study in Urban Transportation', Ph.D. Dissertation, Department of Economics, University of Chicago.
- Luce, R.D., 1959 , 'Individual Choice Behavior', New York, Wiley and sons.
- Luce, R.D., 1958 , 'A probabilistic theory of utility', *Econometrica*, **26**, 193-224.
- Maddala, G.S., 1983 , 'Limited Dependent and Qualitative Variables in Econometrics', Cambridge University Press, Cambridge.
- Mandel B, Gaudry M.J.I et Rothengatter, 1996 , 'A disaggregate Box-Cox logit mode choice model of intercity passenger travel in germany', in Quinet E and R. Vickerman, eds., 'The Econometrics of Major Transport Infrastructures', MacMillan.
- Manski, C., 1977 , 'The Structure of Random Utility Models', *Theory and Decision*, **8**, 229-254.
- Marshack, J., 1960 , 'Binary Choice Constraints on Random Utility Indicators', in Arro, Starling et Suppes, eds., *Mathematical Methods in the Social Science*, Stanford University Press, 312-329.
- McCulloch, R. et P.E. Rossi, 1994 , 'An exact likelihood analysis of the multinomial probit model', *Journal of Econometrics*, **64**, 207-240.
- McCulloch, R., Polson, N. et P.E. Rossi, 1994 , 'A Bayesian Analysis of the Multinomial Probit Model with Fully Identified Parameters', University of Chicago Graduate School of Business Working paper.
- McFadden, D. et K. Train, 2000 , 'Mixed MNL models for discrete response', *Journal of Applied Econometrics*, **15**, 447-470..

- McFadden, D., 2000 , 'Disaggregate behavioral travel demand's RUM Side : A 30-Year Retrospective', International Association for Travel Behavior Research (IATBR) Conference, Gold Coast, Queensland, Australia, July 2-7, 2000.
- McFadden, D., 1998 , 'Measuring willingness-to-pay for transportation improvements', in T. Garling, T. Laitila and K. Westin, eds., 'Theoretical Foundations of Travel Choice Modeling', Elsevier Science, Amsterdam, 339-364.
- McFadden, D. et K. Richter, 1991 , 'Stochastic Rationality and Revealed Stochastic Preference', in Chipman, McFadden et Richter, eds., Preferences, Uncertainty and Rationality, Westview Press, 161-186.
- McFadden, D., 1989 , 'A method of simulated moments for estimation of discrete response models without numerical integration', *Econometrica*, **57**, 995-1026.
- McFadden, D. et K. Train, 1978 , 'The Goods/Leisure Tradeoff and Disaggregate Work Trip Mode Choice Models', *Transportation Research*, **12**, 349-353.
- McFadden, D., 1978 , 'Modeling the choice of residential location', in A.Karlqvist, L.Lundqvist, F.Snickars et J.Weibull, eds., Spatial Interaction Theory and Planning Models, North-Holland, Amsterdam, 75-96.
- McFadden, D., 1974 (a) , 'Conditional logit analysis of qualitative choice behavior', in P.Zarembka, ed., 'Frontiers in Econometrics', Academic Press, New York, 105-142.
- McFadden, D., 1974 (b) , 'The measurement of urban travel demand', *Journal of Public Economics*, **3**, 303-328.
- McFadden, D., 1973 , 'Conditional Logit Analysis of Qualitative Choice Behavior', in P. Zarembka, ed., Frontiers of Econometrics, New York, Academic Press.
- McFadden, D. et K. Richter, 1971 , 'On the Extension of a Set Function on a Set of Events to a Probability on the Generated Boolean σ -algebra', Working Paper, University of California, Berkeley.
- Mohring, H., Schroeter, J. et Wiboonchutikula, P., 1987 , 'The values of Waiting Time, Travel Time, and a Seat on a Bus'. *Rand Journal of Economics*, **18**. 40-56.
- MVA, 1987 , 'The Value of Travel Time Savings', Rapport.
- Newey, W. et D. McFadden, 1994 , 'Large sample estimation and hypothesis testing', in R. Engle and D. McFadden, eds., Handbook of Econometrics, **4**, 2111-2245, North Holland, Amsterdam. Board of Trustees of the Leland Stanford Junior University.
- O'Dea, W.P., 1994. , 'The value of a travel time saving to an individual'. *International journal of Transport Economics*. **21**, 255-267.
- Pakes, A., et D. Pollard, 1989 , 'Simulation and the asymptotics of optimization estimators', *Econometrica*, **57**, 1027-1057.
- Pratt, J., 1964 , 'Risk aversion in the small and in the large', *Econometrica*, **32**, 122-136.
- Piron, V. 1996 , ' Les valeurs du temps dans les infrastructures de transports'. *Transports*, **377**, Mai- Juin, 189-194.

- Quatuor, 1999 , 'Outils dynamiques de simulations pour la gestion des déplacements dans la région parisienne', Rapport Final, 1, DRAST / PREDIT N°98MT30.
- Quarmby, D.A., 1967 , 'Choice of Travel Mode for the Journey to Work : Some Findings', *Journal of Transportation and Economic Policy*, **1**, 273-314.
- Quiggin, J., 1982 , 'A theory of anticipated utility', *Journal of Economic Behavior and Organization*, **3**, 323-343.
- Rothschild, M. et J. Stiglitz, 1970 , 'Increasing risk I : a definition', *Journal of Economic Theory*, **2**, 225-243.
- Rothschild, M. et J. Stiglitz, 1970 , 'Increasing risk II : its economic consequences', *Journal of Economic Theory*, **3**, 66-84.
- Ruud, P., 1996 , 'Approximation and simulation of the multinomial probit model : an analysis of covariance matrix estimation', Working Paper. UC Berkeley, California, CA.
- Savage, L., 1954 , 'The foundations of statistics', John Wiley, New York.
- Small, K., Noland, R.B. et Koskenoja, P. 1995 , 'Socio Economic Attributes and Impacts of Travel Reliability : A Stated Preference Approach'. MOU-117, Rapport Final, 12/07.
- Small, K., 1992 , 'Urban Transportation Planning', Harwood : Chur.
- Small, K., 1982 , 'The scheduling of consumer activities : work trips', *American Economic Review*, **72**, 467-479.
- Stopher, P.R., 1969 , 'A Probability Model of Travel Mode Choice for the Work Journey', *Highway Research Record*, **283**, 57-65.
- Thurstone, L., 1927 , 'A Law of Comparative Judgment', *Psychological Review*, **34**, 273-286.
- Tipping, D.G., 1968 , 'Time savings in transport studies', *The Economic Journal*, **78**, 843-854.
- TRACE, 1997 , 'Review of Existing Evidence on Value of Time', Rapport pour la Commission Européenne, Contrat N°RO-97-SC.2035, Hague Consulting Group Coordination.
- Train, K., 2003 , 'Discrete Choice Methods with Simulation', Cambridge University Press, New York.
- Train, K. et D. McFadden, 2000 , 'Mixed MNL models for discrete response', *Journal of Applied Econometrics*, **15**, 447-470.
- Train, K., 1999 , 'Halton Sequences for Mixed Logit', working paper, Department of Economics, University of California, Berkeley.
- Train, K.E., 1998 , 'Recreation demand models with taste differences over people', *Land Economics*, **74**, 230-239.
- Train, K., 1997 , 'Mixed logit for recreation demand', in C.Kling and J.Herriges, eds., 'Valuing the Environment using Recreation Demand Models', Elgar Press.
- Truong, T.K. et D.A. Hensher, 1985 'Measurement of travel time values and opportunity cost from a discrete-choice model'. *The Economic Journal*, **95**, pp.438-451.

- Tukey, J.W., 1957 , 'On the comparative anatomy of transformations', *Annals of Mathematical Statistics*, **28**, 602-632.
- Vickrey, W., 1969 , 'Congestion Theory and Transport Investment', *American Economic Review*, **59**, 251-260.
- von Neumann, J. et O. Morgenstern, 1947 , 'Theory of Games and Economic Behavior', Princeton University Press.
- Walker and Ben-Akiva, 2002. , 'Generalized Random Utility Model', *Mathematical Social Sciences* **43(3)**, 303-343.
- Wakker, P., 1994 , 'Separating marginal utility and risk aversion', *Theory and Decision*, **36**, 1-44.
- Wardman, M. et Mackie, P., 1997 , 'A Review of the Value of Time ; Evidence from British Experience'. Proceedings of the 25th PTRC European Transport Forum, Brunel University, London.
- Wardrop, J.G., 1952 , 'Some Theoretical aspects of Road Traffic Research', Proceedings of the Institute of Civil Engineers, **1**, 325-378.
- Waters, W.G., 1994 , 'The value of time savings and the link with income : implications for public project evaluation'. *International journal of Transport Economics*. **21**, 243-253.
- Wu, G. et R. Gonzales, 1996 , 'Curvature of the probability weighting function', *Management Science*, **42**, 1676-1690.
- Yaari, M., 1987 , 'The dual theory of choice under risk', *Econometrica*, **55**, 95-115.
- Yaari, M., 1984 , 'Risk aversion without diminishing marginal utilities', Discussion Paper, International Center for Economics, London.